

ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2310-7081 (Online)

Вестник Самарского Государственного Технического Университета

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Издается с августа 1993 г.

Выходит 4 раза в год

Серия

«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

2020. Том 28. № 4

Учредитель – ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Главный редактор серии Э.Я. Рапопорт (д.т.н., проф.)

Отв. секретарь серии И.Г. Минакова

Редакционная коллегия:

А.М. Абакумов (д.т.н., проф.)

Е. Ваакe (проф., Германия)

В.И. Батищев (д.т.н., проф.)

Л.С. Зимин (д.т.н., проф.)

Л.С. Казаринов (д.т.н., проф.)

О.С. Колосов (д.т.н., проф.)

П.К. Кузнецов (д.т.н., проф.)

В.И. Лачин (д.т.н., проф.)

М.Ю. Лившиц (д.т.н., проф.)

S. Luri (проф., Италия)

V. Naske (проф., Германия)

С.П. Орлов (д.т.н., проф.)

Л.Д. Певзнер (д.т.н., проф.)

Ю.Э. Плешивцева (д.т.н., проф.)

В.К. Тян (д.т.н., проф.)

M. Forzan (проф., Италия)

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Вестник Самарского государственного технического университета
Серия «Технические науки» (2020. Том 28. № 4)

Учредитель – ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус

Редактор Г.В. Загребина
Компьютерная верстка И.Г. Минова

Свидетельство о регистрации
ПИ №ФС 77-64449 от 31.12.2015.

Подписано в печать 28.12.20
Выход в свет 28.01.21

Адрес редакции и издателя:
ФГБОУ ВО «Самарский
государственный
технический университет»
443100, г. Самара,
ул. Молодогвардейская, 244
Главный корпус

Формат 70 × 108 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 21,4 п.л.
Уч.-изд. л. 20,8 п.л.
Тираж 500 экз. Рег. № 251/20.
Заказ № 18

Телефон: (846) 337 03 42
E-mail: vest_teh@samgtu.ru
Факс: (846) 278 44 40

Отпечатано в типографии Самарского
государственного технического университета
Адрес типографии:
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.
Корпус 8

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим группам научных специальностей: 05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление; 05.11.00 – Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы; 05.09.00 – Электротехника.

Полнотекстовый доступ к статьям журнала осуществляется на сайте научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU (<http://elibrary.ru>) и на сайте <https://journals.eco-vector.com/1991-8542/>

Подписной индекс в каталоге «Роспечать» 18106
ISSN 1991-8542

© Авторы, 2020
© Самарский государственный
технический университет, 2020

ФЗ № 436-ФЗ	Издание не подлежит маркировке в соответствии с п. 1 ч. 2 ст. 1
----------------	--

Цена свободная

ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2310-7081 (Online)

Vestnik of
Samara
State
Technical
University

SCIENTIFIC JOURNAL

Published since August 1993

Four Issues a Year

Technical Sciences Series

2020. Vol. 28. Issue 4

Founder – Samara State Technical University

Editor-in-Chief of Series E.Y. Rapoport (Dr. Techn. Sci., Prof.)

Executive Secretary of Series I.G. Minakova

Editorial board

A.M. Abakumov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

E. Baake (Prof. Leibniz University of Hannover, Germany)

V.I. Batishchev (Dr. Techn. Sci., Prof.)

L. S. Zimin L.S. (Dr. Techn. Sci., Prof.)

L.S. Kazarinov (Dr. Techn. Sci., Prof., South Ural State University)

O.S. Kolosov (Dr. Techn. Sci., Prof., Moscow Power Engineering Institute)

P.K. Kuznetsov P. K. (Dr. Techn. Sci., Prof.)

V.I. Lachin (Dr. Techn. Sci., Prof., South-Russian State Technical University (NPI))

M.Y. Livshits (Dr. Techn. Sci., Prof.)

S. Lupi (Prof., University of Padua, Italy)

B. Nacke (Prof., Leibniz University of Hannover, Germany)

S.P. Orlov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

L.D. Pevzner (Dr. Techn. Sci., Prof., Moscow State Mining University)

Y.E. Pleshivtseva (Dr. Techn. Sci., Prof.)

V.K. Tian (Dr. Techn. Sci., Prof.)

M. Forzan (Prof., University of Padua, Italy)

Edited by G. V. Zagrebina
Compiled and typeset by I. G. Minakova

The Editorial Board Address:

Dept. of Automatic and Control in Technical Systems

Samara State Technical University

244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Phone: +7(846) 337 03 42

E-mail: vest_teh@samgtu.ru

Printed at the Samara State Technical University Press

The journal is included in the Russian Science Citation Index.

The journal is included in VINITI (<http://www.viniti.ru>) abstracts databases.

The full-text electronic version of journal is hosted by the web-site of scientific electronic library eLIBRARY.RU and by the site SamGTU (<http://vestnik-teh.samgtu.ru>) and by the site <https://journals.eco-vector.com/1991-8542/>

The subscription index in Rospechat catalogue 18106
ISSN 1991-8542

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

<i>Дилигенская А.Н., Самокиш А.В.</i> Параметрическая идентификация в обратных задачах теплопроводности в условиях интервальной неопределенности на основе нейронных сетей.....	6
<i>Ильина Н.А., Рапопорт Э.Я.</i> Двухканальное оптимальное по быстрдействию управление нестационарным процессом теплопроводности с учетом инерционности граничных управляющих воздействий.....	19
<i>Коньгин С.Б., Коноваленко Д.В., Крючков Д.А.</i> Адаптивная система поддержания качества промысловой подготовки нефти с идентифицируемой моделью.....	32
<i>Рагазин Д.А., Чостковский Б.К.</i> Синтез релейной системы с переменным гистерезисом как альтернатива скользящему режиму управления.....	50
<i>Сусарев С.В.</i> Модели оценки эффективности технического обслуживания роботизированных транспортных средств.....	62

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

<i>Лихтциндер Б.Я.</i> Сенсорные сети – распределенные информационно-измерительные и информационно-управляющие системы.....	77
<i>Сайфуллин Р.Т., Бочкарев А.В.</i> Вычисление коэффициентов асимметрии и эксцесса хроматографических пиков с применением функций Чебышева – Эрмита и рядов Грама – Шарлье.....	89

Электротехника

<i>Артюхов И.И., Земцов А.И., Пыльская Е.К., Молот С.В.</i> Моделирование и исследование системы электропитания мультигенераторной установки СВЧ-нагрева.....	106
<i>Кубарьков Ю.П., Макаров Я.В., Солдаткина К.А.</i> Оптимизация режима работы распределительных сетей с активно-адаптивными элементами.....	118
<i>Лысов В.Е., Поляков В.А.</i> Структурно-параметрическая идентификация поворотного стола.....	131
<i>Макаричев Ю.А., Иванников Ю.Н., Ратцев Я.А., Полянский Е.А.</i> Комбинированный магнитный подвес.....	142
<i>Стариков А.В., Стрижакова Е.В., Беляева О.С., Альтахер Аббас А. Карим.</i> Наблюдатель скорости вращения асинхронного двигателя.....	155

Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 681.5.015

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ В ОБРАТНЫХ ЗАДАЧАХ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В УСЛОВИЯХ ИНТЕРВАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ*

А.Н. Дилигенская, А.В. Самокиш

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. Работа посвящена развитию методов параметрической идентификации, применяемых для решения обратных задач технологической теплофизики в условиях интервальной неопределенности параметров. При решении таких задач в условиях действия возмущающих факторов использование искусственных нейронных сетей, воспроизводящих структуру оператора прямой задачи при небольшой размерности искомого вектора параметров, позволяет получить удовлетворительные результаты. На примере граничной обратной задачи теплопроводности предложен вариант построения нейронной сети для решения задачи с известной структурой математического оператора, характеризующегося небольшим числом параметров. Метод позволяет использовать априорную информацию о допустимом диапазоне принадлежности идентифицируемых характеристик или их параметров. Входными данными для нейросетевой модели являются все возможные реализации температурных состояний, полученные как реакции на входное воздействие, в качестве которого выступает идентифицируемая характеристика, удовлетворяющая всем допустимым вариантам сочетания параметров.

Решение задачи представляет итерационную процедуру, на каждом шаге которой с помощью нейронной сети уточняется значение одного из параметров, задающих параметрическое представление искомой величины. Сочетание нейросетевых технологий с качественной информацией о закономерностях протекания процессов нестационарной теплопроводности позволяет повысить точность решения задачи параметрической идентификации в условиях действия возмущений. Продемонстрированы варианты решения граничной обратной задачи теплопроводности при одно- и двухпараметрическом представлении искомой характеристики в условиях действия возмущений. Исследована точность решения задачи в зависимости от интенсивности возмущающего воздействия.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-08-00048 и № 18-08-00565.

Дилигенская Анна Николаевна, д.т.н., профессор кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

Самокиш Александр Валерьевич, аспирант кафедры «Информационные и развивающие системы и технологии».

Ключевые слова: обратная задача теплопроводности, параметрическая идентификация, интервальная неопределенность, нейросетевая модель.

Введение

Теория идентификации широкого ряда технологических процессов или технических объектов и систем, их свойств и отношений находит свое применение в различных областях науки и техники и является базовым компонентом для эффективного решения задач управления производствами или для проектирования промышленного оборудования. В каждой производственной сфере разрабатываются наиболее пригодные для использования подходы и методы структурной, параметрической или непараметрической идентификации, определенные спецификой предметной области исследований.

В области технологической теплофизики задачи идентификации процессов нестационарной теплопроводности сводятся к определению по измеряемым температурным полям неизвестных характеристик, среди которых наиболее типичными являются задачи восстановления внешних воздействий (тепловых потоков на поверхности, коэффициентов теплообмена между взаимодействующими средами), функций мощности внутренних тепловых источников, теплофизических характеристик материалов или начального состояния системы [1]. Такие задачи, предусматривающие нахождение одной или нескольких характеристик процесса по результатам измерения температурных полей, относятся к обратным задачам теплопроводности (ОЗТ), которые в зависимости от идентифицируемой характеристики подразделяются на граничные, внутренние, коэффициентные и ретроспективные ОЗТ.

Разработка методов решения обратных задач математической физики, в том числе обратных задач теплопроводности, является актуальным, быстро развивающимся направлением, и на сегодняшний день существует большое число методов [2, 3], основанных на различных приемах и подходах теории решения некорректных и обратных задач математической физики, идентификации, вычислительной математики, теории оптимального управления, искусственного интеллекта.

В большинстве подходов решение задачи структурной идентификации, как правило, сводится к формализации и структуризации исследуемых явлений в рамках совокупности конечного числа математических моделей, разработке алгоритмов генерации структурных зависимостей (альтернатив) и их перебору с целью выбора альтернативы, наиболее удовлетворяющей поставленному многофакторному критерию. Наличие априорной информации об операторе искомой характеристики и о математической модели объекта позволяет сразу перейти к этапу параметрической идентификации.

Если математическая модель, содержащая искомую характеристику, в остальном известна с высокой степенью достоверности и уровень возмущающих воздействий не является высоким, то значительными преимуществами обладают методы параметрической идентификации, основанные на использовании аналитических условий оптимальности [4, 5]. Эти методы показали эффективность их использования и высокую достоверность результатов в сочетании с относительно невысокой трудоемкостью реализации.

В ситуации, когда анализ объекта исследования может быть отнесен к слабоструктурированным проблемам вследствие сочетания неопределенных факторов различной природы, возникает потребность в разработке альтернативных

подходов, позволяющих находить регулярные решения в условиях неполноты и неточности исходной информации [6–9].

В данной статье предлагается подход к решению задачи параметрической идентификации на основе применения искусственных нейронных сетей (ИНС) [10–12], использующих информацию о структуре оператора прямой задачи при небольшой размерности искомого вектора параметров, в условиях неполноты и неточности исходной информации, обусловленных действием возмущающих факторов.

Постановка обратной задачи технологической физики в условиях неполноты информации

Рассматривается базовая математическая модель относительно температурного поля $T(x,t)$ в процессе нестационарной теплопроводности одномерного объекта канонической формы, заданная одномерным линейным уравнением Фурье в относительных координатах

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2}, \quad 0 < x < 1, \quad 0 < t < t^*, \quad (1)$$

дополненная краевыми условиями

$$T(x,t) = 0, \quad x \in [0;1]; \quad \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial T(1,t)}{\partial x} = q(t). \quad (2)$$

На основе представленного математического описания формулируется модельная граничная ОЗТ, предусматривающая нахождение неизвестной функции плотности теплового потока $q(t)$, действующего на границе $x=1$ заданной пространственной области, при известных прочих параметрах и характеристиках по полученной экспериментальной информации $T^* = T(x^*, t)$ о температуре в некоторой точке $x^* \in [0,1]$. Результаты эксперимента неизбежно содержат возмущения, о которых известно, что они удовлетворяют нормальному закону распределения плотности вероятностей.

Выбор структуры математической модели основывается на физических особенностях процессов технологической теплофизики. Вследствие инерционности тепловых объектов идентифицируемые характеристики и результирующая температура, как правило, не содержат резких локальных скачков, что позволяет в зависимости от типа исследуемой ОЗТ ограничить выбор семейства структур искомым величинами классами достаточно гладких функций.

Для основополагающих граничных ОЗТ изменение плотности граничного теплового потока может быть описано согласно [1] с помощью следующих типовых функций: постоянных, монотонных, линейных (возрастающих или убывающих), параболических, кубических, экспоненциальных, а также гармонических, или их комбинаций. Каждый альтернативный вариант структуры математической модели характеризуется определенным вектором параметров $\gamma^{(n)} = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n)$, значения которых могут быть найдены в результате параметрической оптимизации с использованием сформулированного определенным образом функционала качества. Для исследования базовых основ и возможностей использования нейросетевых технологий для решения задачи параметрической

идентификации процессов нестационарной теплопроводности в работе в качестве математических операторов искомой функции – плотности теплового потока – рассматриваются простые базовые функциональные зависимости от времени, характеризующиеся малым числом параметров: постоянные и экспоненциальные функции.

Построение нейросетевой модели процесса нестационарной теплопроводности

Для решения обратной задачи теплопроводности в условиях действия возмущающих факторов использованы искусственные нейронные сети [13–15], обеспечивающие непосредственное восстановление искомых параметров на основе входной информации, что соответствует переходу от процедуры минимизации невязки к аппроксимации идентифицируемой характеристики путем обучения построенной ИНС. В основу такого подхода положена способность нейронных сетей аппроксимировать искомые зависимости с требуемой точностью.

Предполагается, что решение ОЗТ осуществляется при наличии некоторого объема априорной информации о значениях параметров восстанавливаемой характеристики, что, как правило, соответствует минимальным сведениям об условиях реализации конкретного процесса. Эта информация используется для формирования обучающей выборки нейросетевой модели. Априорная информация может принимать форму интервальной неопределенности, когда доступные сведения заключаются в информации о границах диапазона возможного изменения идентифицируемых параметров $\gamma_i \in \gamma^{(n)}: \gamma_{i\min} \leq \gamma_i \leq \gamma_{i\max}$. Заданные диапазоны $(\gamma_{i\min}, \gamma_{i\max})$ изменения значений для каждого из параметров $\gamma_i, i = \overline{1, n}$ с помощью равномерного шага дискретизации $\Delta\gamma_i$ разбиваются на одномерные массивы $(\gamma_1^{(i)}, \gamma_2^{(i)}, \dots, \gamma_k^{(i)}); \gamma_1^{(i)} = \gamma_{i\min}; \gamma_k^{(i)} = \gamma_{i\max}; \gamma_{j+1}^{(i)} - \gamma_j^{(i)} = \Delta\gamma_i, j = \overline{1, k-1}$, которые в дальнейшем используются в качестве входных данных ИНС. Выбор шага дискретизации может выбираться исследователем и в общем случае зависит от достоверности априорной информации. Так, если интервал возможного изменения параметров слишком широк, то возможно поэтапное решение задачи, предусматривающее постепенное сужение допустимого диапазона и, соответственно, уменьшение шага дискретизации. В таких условиях при использовании линейной математической модели, заданной в относительных координатах, приведение исходных данных к относительным единицам измерения позволит достичь унификации процедуры обучения ИНС.

Обучающая выборка, содержащая результирующую температуру $T(x^*, t)$, полученную в некоторой точке $x^* \in [0, 1]$ на интервале наблюдения $t \in [0, t^*]$ и соответствующую искомой функции $q(t)$, формируется для всех возможных сочетаний значений параметров $(\gamma_1^{(1)}, \gamma_2^{(1)}, \dots, \gamma_{k_1}^{(1)}) \times (\gamma_1^{(2)}, \gamma_2^{(2)}, \dots, \gamma_{k_2}^{(2)}) \times \dots \times (\gamma_1^{(n)}, \gamma_2^{(n)}, \dots, \gamma_{k_n}^{(n)})$ на базе основного интегрального соотношения общего решения тепловой задачи

$$T(x, t) = \int_0^t G(x, 1, t - \tau) q(\tau) d\tau, \quad (3)$$

где $G(x, \xi, t - \tau)$ – функция Грина, соответствующая краевой задаче (1), (2).

При постоянной плотности теплового потока $q(t) = q_0 = \text{const}$ выражение (3) принимает вид

$$T(x, t) = q_0 t + 2q_0 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m}{\pi^2 m^2} \left(1 - e^{-\pi^2 m^2 t}\right) \cos(\pi m x), \quad (4)$$

а при экспоненциальной зависимости $q(t) = q_0 (1 - e^{-\beta t})$ температура $T(x, t)$ описывается соотношением

$$T(x, t) = q_0 t - \frac{q_0}{\beta} (1 - e^{-\beta t}) + 2q_0 \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \left(\frac{1 - e^{-\pi^2 m^2 t}}{\pi^2 m^2} + \frac{e^{-\pi^2 m^2 t} - e^{-\beta t}}{\pi^2 m^2 - \beta} \right) \cos(\pi m x). \quad (5)$$

Для построения адекватной модели процесса нестационарной теплопроводности использовалась двухслойная нейронная сеть с двадцатью пятью нейронами в скрытом слое. Процесс обучения ИНС, обеспечивающий нахождение значений синаптических весов нейронной сети, реализован на основе алгоритма обучения «байесовская регуляризация» с использованием сигмоидной функции активации. Оценка эффективности полученной нейросетевой модели проводилась на основе среднеквадратичного отклонения между зашумленной температурной зависимостью, построенной на основе (4) или (5), и модельным распределением температуры, в котором в качестве $q(t)$ использовалась постоянная или экспоненциальная функция, параметры которой получены с помощью ИНС.

Параметрическая идентификация граничного воздействия в условиях неполноты экспериментальной информации

Решение ОЗТ, позволяющее провести оценивание параметров неизвестной характеристики на основе экспериментальной информации при априорно заданной структуре искомого воздействия, является задачей параметрической идентификации.

В качестве экспериментальной информации $T^*(x^*, t)$ использовались данные $T^*(x^*, t) = T(x^*, t) + \delta \cdot \text{randn}$, полученные на основе выражения (4) или (5) в точке x^* на интервале идентификации $t \in [0, t^*]$ в выборочные моменты времени $t \in (t_1, t_2, \dots, t_N)$, $t_1 = 0; t_N = t^*$ с учетом случайных возмущений, распределенных по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратичным отклонением (СКО) δ .

Решение задачи в классе постоянных функций $q(t) = q_0 = \text{const}$ можно рассматривать как начальный этап для определения начального приближения для последующей итерационной процедуры поиска решений на множестве с большим числом параметров. В этом случае само значение q_0 и является единственным искомым параметром $\gamma = q_0$.

Эффективность решения поставленной задачи существенно зависит от априорной информации об идентифицируемом воздействии. Задача решена в условиях интервальной неопределенности величины q_0 , когда полагается, что имеются сведения о границах интервала возможного изменения $q_0 \in [q_{\min}, q_{\max}]$, что, как правило, доступно на основе очевидных соображений или существующих ограничений. Обучающая выборка заполняется из допустимых значений $q_0 \in [q_1, q_2, \dots, q_k]$; $q_1 = q_{\min}, q_k = q_{\max}$ и значений температуры $T^0(x^*, t, q_0)$, полученных согласно (4) в те же моменты времени $t \in (t_1, t_2, \dots, t_N)$ для всех возможных значений q_0 . Таким образом, входные данные представлены в виде массива размерностью $[N \times k]$.

Идентификация тепловых процессов в случае, когда параметрическое представление искомой характеристики содержит единственный параметр γ , является частным случаем общей многопараметрической задачи [16]. Возможности применения ИНС для решения граничной ОЗТ, когда параметрическая форма $q(t)$ описывается двумя параметрами, были исследованы при поиске идентифицируемой функции в классе экспоненциальных зависимостей

$$q(t) = q_0(1 - e^{-\beta t}) = \gamma_1(1 - e^{\gamma_2 t}), \gamma = (\gamma_1, \gamma_2), \quad (6)$$

учитывающих инерционность тепловых процессов.

Одним из распространенных и универсальных подходов к решению многопараметрической задачи является автономная идентификация каждого из n параметров на основе построения n нейронных сетей с одним выходом каждая. Для учета взаимного влияния параметров друг на друга может быть реализовано рекурсивное поэтапное выполнение алгоритма автономной идентификации параметров, при котором на каждом очередном этапе на вход НС подаются значения параметров, полученные на предшествующем этапе, и соответствующие им модельные температурные распределения. Последовательный расчет этапов завершается, когда ошибка аппроксимации экспериментальных данных модельной зависимостью становится меньше некоторого априорно заданного значения функционала идентификации, формируемого, как правило, на основе абсолютного или среднеквадратичного значения температурной невязки.

Таким образом, решение сформулированной ОЗТ в классе функций (6) сводилось к последовательному расчету двух параметров q_0 и β . Первый этап расчета q_0 выполняется вышеописанным способом при зафиксированном на основе априорной информации значении $\beta^{(0)}$. Найденное в результате первого этапа значение $q_0^{(1)}$ фиксируется и используется на следующем этапе для формирования обучающих данных ИНС, восстанавливающей значение β . В этом случае формируется выборка допустимых значений искомого параметра $\beta \in [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k]$; $\beta_1 = \beta_{\min}, \beta_k = \beta_{\max}$, аналогично первому этапу, и соответствующих им модельных температурных кривых $T^0(x^*, t, q_0^{(i)} \beta^{(i)})$. Завершение итерационной процедуры происходит на основе абсолютного или относительного среднеквадратичного значения температурной невязки в соответствии с выполнением усло-

вий $\varepsilon^{(i)} < \varepsilon_{\text{доп}}^{\text{abc}}$ или $|\varepsilon^{(i)} - \varepsilon^{(i-1)}| < \varepsilon_{\text{доп}}^{\text{отн}}$. При этом найденные на очередном i -ом этапе расчета значения $q_0^{(i)}$ и $\beta^{(i)}$ могут быть использованы для сужения области допустимых решений $\gamma \in [\gamma_{\min}, \gamma_{\max}]$ на следующем $i+1$ -ом этапе.

Вычислительный эксперимент и полученные результаты

Решение задачи в классе постоянных функций

Изложенная методика была опробована на следующих модельных данных. Искомая постоянная величина плотности теплового потока, используемая для расчета «экспериментальной» температуры, была принята $q_0^* = 0.97$. Для оценки временного интервала идентификации использовались относительные единицы $t \in [0, 0.01, 0.02, \dots, 1]$, где шаг дискретизации составлял $\Delta t = 0.01$, а размер выборки по временной переменной $N = 101$. Предполагалось, что априорная информация о границах изменения искомой величины была известна лишь приблизительно, в связи с чем допустимый интервал был принят как $q_0 \in [q_{\min}, q_{\max}]$; $q_{\min} = 0, q_{\max} = 5$, что соответствует более чем пятикратному превышению истинного значения. В зависимости от интенсивности помехи шаг дискретизации был принят от $\Delta q = 0.05$ (при $\delta = 0\%$) до $\Delta q = 0.01$ (при $\delta = 15\%$), что соответствовало от $k = 101$ до $k = 501$ значению обучающей выборки.

Результаты одного из возможных решений задачи с применением нейросетевых технологий, демонстрирующие их свойства, представлены в табл. 1. Здесь полученное на основе нейронной сети значение искомой величины плотности теплового потока обозначено как $q_0^{(ИНС)}$. Среднеквадратичная погрешность температурного распределения рассчитывалась по формуле

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N \left(T^*(x^*, t) - T^0(x^*, t, q_0^{(ИНС)}) \right)^2, \quad (7)$$

где $T^0(x^*, t, q_0^{(ИНС)})$ соответствовало найденному значению $q_0^{(ИНС)}$.

Результаты показывают влияние уровня случайного возмущения в каждом из опытов, но при этом отражают сглаживающие свойства нейросетевых моделей в условиях действия неопределенных факторов. Восстановленные значения $q_0^{(ИНС)}$ в серии экспериментов зависят от случайной составляющей, при этом значения среднеквадратичной погрешности аппроксимирующей температурной кривой отражают зависимость от уровня СКО возмущающего воздействия.

Таблица 1

Точность параметрической идентификации в классе постоянных функций в зависимости от величины СКО погрешности измерения

$\delta, \%$	0	1	5	10	15
$q_0^{(ИНС)}$	0.9700	0.9725	0.9305	0.9993	0.9642
ε	2.6988e-11	1.0909e-04	0.0027	0.0094	0.0215

Решение задачи в классе экспоненциальных функций

В данном модельном примере искомые значения параметров были приняты следующими: $q_0^* = 0.97$; $\beta = 47$, временной интервал соответствовал предыдущему случаю. На основе априорной информации об экспоненциальной зависимости искомой плотности теплового потока выбраны границы интервала изменения параметра $\beta \in [4, 800]$ как предельные значения, определяющие требуемый характер зависимости на заданном временном интервале (рис. 1). В случае $\beta < 4$ зависимость (6) на интервале $t \in [0, 1]$ не выходит на установившееся значение, а при $\beta > 800$ участок изменения $q(t)$ является столь малым, что им можно пренебречь и искать $q(t)$ в классе постоянных функций. В зависимости от интенсивности помехи полученный диапазон был поделен с использованием шага дискретизации от $\Delta\beta = 4$ до $\Delta\beta = 1$, на основе чего был сформирован входной массив значений β и соответствующих им температурных распределений $T^0(x^*, t, \beta)$ для обучения второй ИНС. Начальное приближение $\beta^{(0)}$ выбрано равным 10. Характер кривых для всех трех случаев показан на рис. 1.

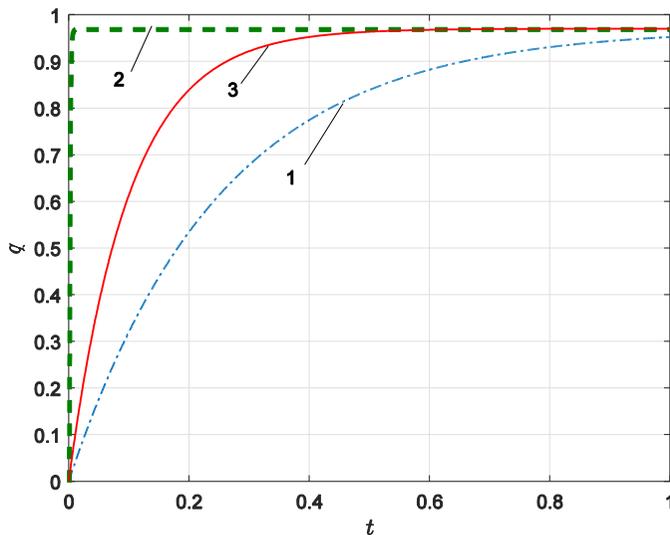


Рис. 1. Экспоненциальный характер $q(t)$ для предельных значений β_{\min} — (1), β_{\max} — (2) и среднего значения β — (3)

На каждом из расчетных этапов точность определения каждого из параметров $\gamma^{(i)}$, $i = 1, 2$ существенно зависит от априорно задаваемого значения другого параметра, что особенно сказывается при возрастании уровня возмущающего воздействия. При отсутствии априорной информации для обеспечения сходимости решения к искомому значению рекомендуется сочетание нейросетевых технологий с численными алгоритмами, устанавливающими дополнительные ограничения на принадлежность искомым параметрам определенным диапазонам на основе анализа поведения температурного поля исходя из его качественных свойств. Такой подход позволяет получить адекватные результаты при решении

двухпараметрической задачи (табл. 2, рис. 2–4). Итерационное выполнение указанных двух этапов по идентификации параметров q_0 и β проводилось до выполнения условия $|\varepsilon^{(i)} - \varepsilon^{(i-1)}| < \varepsilon_{\text{доп}}$.

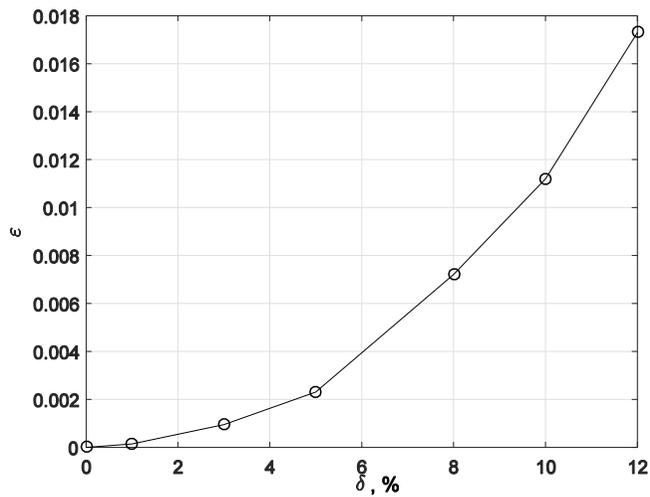


Рис. 2. Зависимость точности решения $\varepsilon, \%$ от уровня СКО случайного возмущения

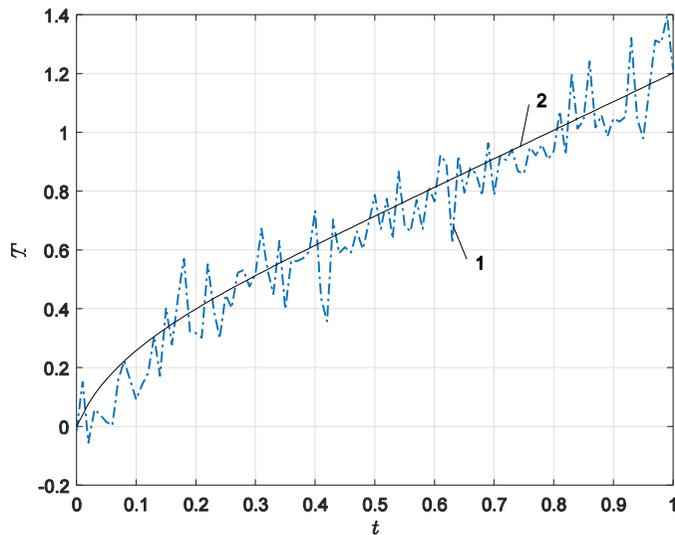


Рис. 3. Зашумленная температурная кривая $T^*(x^*, t)$ при $\delta=10\%$, используемая в качестве экспериментальной информации – (1), и полученное модельное распределение $T^0(x^*, t, q_0^{(ИНС)}, \beta^{(ИНС)})$ – (2)

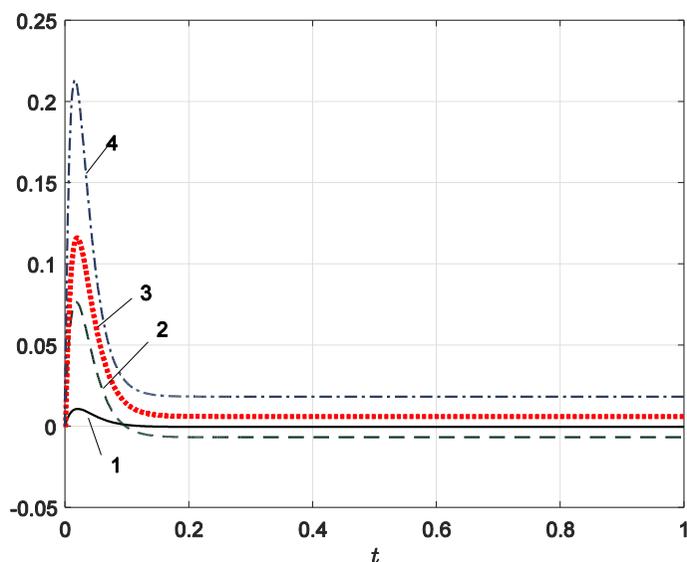


Рис. 4. Погрешность $q^{(MHC)}(t) - q(t)$
 при $\delta = 0\%$ –1, $\delta = 3\%$ –2, $\delta = 5\%$ –3, $\delta = 10\%$ –4

Таблица 2

**Точность параметрической идентификации в классе экспоненциальных функций
 в зависимости от величины СКО погрешности измерения**

$\delta, \%$	0	1	3	5	10
$q_0^{(MHC)}$	0.9696	0.9730	0.9632	0.9765	0.9882
$\beta^{(MHC)}$	48.4582	63.4085	59.0270	64.4264	82.9217
ε	2.4076e-07	1.4406e-04	9.5059e-04	0.0023	0.0112

Выводы

В работе предложен подход к нейросетевому решению задачи параметрической идентификации при заданной структуре математического оператора искомой характеристики. Проведенные исследования подтверждают возможность использования интеллектуальных методов для решения обратных задач математической физики в условиях неполноты информации в ряде случаев, когда искомая зависимость может быть аппроксимирована функцией с небольшим числом параметров.

Качество работы алгоритма существенно зависит от погрешности исходных данных. С увеличением числа параметров при действии возмущающих факторов для получения удовлетворительной точности решения нейросетевые технологии рекомендуется дополнять алгоритмами, контролирующими поведение искомых и измеряемых характеристик на основе их базовых свойств. Использование априорной информации позволяет повысить точность решения и уменьшить вычислительную сложность.

Предложенный подход может быть в дальнейшем распространен на структурные операторы более сложной формы, характеризующиеся вектором параметров большей размерности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Алифанов О.М.* Обратные задачи теплообмена. М.: Машиностроение, 1988. 280 с.
2. *Бек Дж., Блакуэлл Б., Сент-Клэр Ч. мл.* Некорректные обратные задачи теплопроводности. М.: Мир, 1989. 312 с.
3. *Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В.* Экстремальные методы решения некорректных задач. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит, 1988. 288 с.
4. *Дилигенская А.Н., Рапопорт Э.Я.* Аналитические методы параметрической оптимизации в обратных задачах теплопроводности с внутренним тепловыделением // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87. № 5. С. 1082–1089.
5. *Diligenskaya A.N.* Methods of Sequential Parametric Optimization in Inverse Problems of Technological Thermophysics // 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). Samara, Russia, 2019. pp. 267–270.
6. *Грангшвили И.В., Потоцкий В.А., Гинсберг К.С., Смолянинов В.В.* Идентификация систем и задачи управления: на пути к современным системным методологиям // Проблемы управления. 2004. № 4. С. 2–15.
7. *Воронова Н.П., Ковалев С.М., Шабельников А.Н.* Идентификация и оценивание состояний нечетких динамических систем // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 6 (179). С. 128–130.
8. *Бердник В.В., Мухамедяров Р.Д.* Применение метода нейронных сетей для решения обратной задачи теплопереноса // ТВТ. 2003. Т. 41. № 6. С. 942–947.
9. *Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю.* Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. М.: Физматлит, 2001. 221 с.
10. *Хайкин С.* Нейронные сети: полный курс. 2-е изд. М.: И.Д. Вильямс, 2006. 1104 с.
11. *Аксёнов С.В., Новосельцев В.Б.* Организация и использование нейронных сетей (методы и технологии). Томск, 2006. 128 с.
12. *Лысенко Д.С., Данилушкин И.А.* Динамическая модель котла-утилизатора на базе рекуррентной нейронной сети // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2020. Т. 28. № 2. С. 59–72.
13. *Замятин Н.В., Медянцева Д.В.* Методика нейросетевого моделирования сложных систем // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309. № 8. С. 100–106.
14. *Gorbachenko V.I., Lazovskaya T.V., Tarkhov D.A., Vasilyev A.N., Zhukov M.V.* Neural Network Technique in Some Inverse Problems of Mathematical Physics. In: Cheng L., Liu Q., Ronzhin A. (eds) Advances in Neural Networks – Lecture Notes in Computer Science, 2016. V. 9719.
15. *Pavlov D.Yu.* Neural networks in solution of inverse coefficient heat conduction problem // Вестник МГУ. Серия 15: ВМК. 1994. № 4. С. 44–51.
16. *Eremenko Y.I., Poleshchenko D.A., Tsygankov Y.A.* Development of neural network model of the multiparametric technological object. J. Fundam. Appl. Sci., 2017. 9 (7S). Pp. 706–721.

Статья поступила в редакцию 3 октября 2020 г.

PARAMETRIC IDENTIFICATION IN INVERSE HEAT CONDUCTION PROBLEMS UNDER INTERVAL UNCERTAINTY BASED ON NEURAL NETWORKS

A.N. Diligenskaya, A.V. Samokish

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, Russian Federation

Abstract. *The application of parametric identification methods used to solve inverse problems of technological thermophysics under conditions of interval uncertainty of parameters is considered. To solve such problems under the action of disturbing factors, artificial neural networks can be used that reproduce the structure of the operator of the direct problem with a small dimension of the desired vector of parameters. A variant of constructing a neural network for solving the boundary inverse heat conduction problem with a known structure of a mathematical operator, characterized by a small number of parameters, is proposed. The method allows the use of a priori information about the admissible range of belonging of the identified characteristics or their parameters. The input data for the neural network model are all possible realizations of temperature states, obtained as a reaction to the input action, which is an identifiable characteristic that satisfies all permissible options for the combination of parameters.*

The solution of the problem is an iterative procedure, at each step of which, using a neural network, the value of one of the parameters specifying the parametric representation of the desired value is refined. The combination of neural network technologies with high-quality information about the regularities of non-stationary heat conduction processes makes it possible to increase the accuracy of solving the problem of parametric identification under conditions of disturbances. Variants of solving the boundary inverse problem of heat conduction with one- and two-parameters representation of the desired characteristic under the conditions of disturbances are demonstrated. The accuracy of solving the problem is investigated depending on the intensity of the disturbing effect.

Keywords: *inverse heat conduction problem, parametric identification, interval uncertainty, neural network model*

REFERENCES

1. *Alifanov O.M.* Obratnye zadachi teploobmena [Inverse Heat Transfer Problems]. Moscow: Mashinostroenie, 1988, 280 p. (In Russian).
2. *Beck J.V., Blackwell B., C.R. Jr St. Clair.* Inverse Heat Conduction: Ill-Posed Problems, New York: Wiley, 1985.
3. *Alifanov O.M., Artyukhin E.A., Rumyantsev S.V.* Jekstremal'nye metody reshenija nekorrektnykh zadach [Extremum Methods of Solution of Ill-Posed Problems and Their Application to Inverse Heat-Transfer Problems]. Moscow: Nauka, 1988, 288 p. (In Russian).
4. *Diligenskaya A.N., Rapoport E.Ya.* Analytical methods of parametric optimization in inverse heat-conduction problems with internal heat release // J. Eng. Phys. Thermophys., 2014. Vol. 87, no. 5, p. 1126.
5. *Diligenskaya A.N.* Methods of Sequential Parametric Optimization in Inverse Problems of Technological Thermophysics // 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). – Samara, Russia, 2019. pp. 267–270.
6. *Pranghishvili I.V., Lototsky V.A., Ghinsberg K.S., Smolyaninov V.V.* System identification and control problems: on the way to modern system methodologies // Control Sciences. 2004. № 4. Pp. 2–15 (In Russian).

*Anna N. Diligenskaya (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Alexandr V. Samokish, Postgraduate Student.*

7. *Voronova N.P., Kovalev S.M., Shabelnikov A.N.* Identification and estimation of states for fuzzy dynamical systems // *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2016. № 6 (179). Pp. 128-130 (In Russian).
8. *Berdnik V.V., Mukhamedyarov R.D.* Application of the Method of Neural Networks to Solution of the Inverse Problem of Heat Transfer // *High Temperature*, 2003, V. 41, pp. 839–843.
9. *Kruglov V.V., Dli M.I., Golunov R.Y.* Nechetkaja logika i iskusstvennye neyronnye seti [Fuzzy logic and artificial neural networks]. Moscow: Fizmatlit, 2001. 221 p. (In Russian).
10. *Haykin S.* Neyronnye seti: polnyj kurs. 2-e izd [Neural networks: full course. 2nd ed.], Rev. M.: I.D. Williams, 2006. 1104 p. (In Russian).
11. *Aksenov S.V., Novoseltsev V.B.* Organizacija i ispol'zovanie neyronnyh setej (metody i tehnologii) [Organization and use of neural networks (methods and technologies)]. Tomsk, 2006 (In Russian).
12. *Lusenko D.S., Danilushkin I.A.* Dynamic model of waste heat boiler based on recurrent neural network // *Vestn. Samar. Gos. Tehn. Un-ta. Tehn. Nauki*, 2020. V. 28, No. 2. Pp. 59–72 (In Russian).
13. *Zamyatin N.V., Medyantsev D.V.* Methods of neural network modeling of complex systems // *Izvestia Tomsk. Pol-teh Un-ta*, 2006. No. 8. Pp. 100–106. (In Russian).
14. *Gorbachenko V.I., Lazovskaya T.V., Tarkhov D.A., Vasilyev A.N., Zhukov M.V.* Neural Network Technique in Some Inverse Problems of Mathematical Physics. In: Cheng L., Liu Q., Ronzhin A. (eds) *Advances in Neural Networks – Lecture Notes in Computer Science*, 2016. V. 9719.
15. *Pavlov D.Yu.* Neural network solution of the coefficient inverse heat conduction problem // *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 15: Vych. Mat. Kibern.*, 1994, no. 4, pp. 51–56.
16. *Eremenko Y.I., Poleshchenko D.A., Tsygankov Y.A.* Development of neural network model of the multiparametric technological object // *J. Fundam. Appl. Sci.*, 2017. 9 (7S). Pp. 706–721.

УДК 681.5

**ДВУХКАНАЛЬНОЕ ОПТИМАЛЬНОЕ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ
УПРАВЛЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫМ ПРОЦЕССОМ
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ С УЧЕТОМ ИНЕРЦИОННОСТИ
ГРАНИЧНЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ******Н.А. Ильина, Э.Я. Рапопорт***Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: ilina.natalyaa@yandex.ru, edgar.rapoport@mail.ru

Аннотация. *Предлагается постановка и метод расчета алгоритмов оптимального по быстродействию управления процессом нагрева неограниченной пластины с двумя внешними сосредоточенными управляющими воздействиями по величине тепловых потоков на ее поверхностях в нагревательной установке с внешним теплообменом. Основная особенность задачи заключается в учете инерционности обоих управляющих воздействий, создаваемой за счет динамики процессов теплопередачи в рабочем пространстве печи. Рассматриваемая задача формулируется в условиях заданной точности равномерного приближения конечного температурного распределения по толщине пластины к заданному. Для решения данной задачи предлагается известный подход, использующий предварительную параметризацию управляющих воздействий на основе аналитических условий оптимальности в форме принципа максимума Понтрягина. На следующем этапе предлагаемый метод сводится к редукции исходной задачи оптимального управления к математической задаче полубесконечной оптимизации, решение которой находится с помощью альтернативного метода. Альтернативные свойства конечного результирующего температурного состояния в конце оптимального процесса приводят к специальной системе уравнений, которая при наличии дополнительной информации о форме кривой пространственного температурного распределения сводится к системе уравнений, предельно допустимых отклонений от заданной температуры и разрешаемой относительно всех искомым неизвестных. Приводится пример задачи оптимального по быстродействию управления температурным полем неограниченной пластины в печах с внешним теплообменом, результаты ее решения и их анализ.*

Ключевые слова: *оптимальное управление, двухканальное управление, альтернативный метод, задача полубесконечной оптимизации, нагревательные печи.*

Постановка и решение задачи оптимального управления по критерию быстродействия с заданной точностью достижения желаемого температурного распределения в нагреваемой заготовке представляет практический интерес, поскольку позволяет выбрать наиболее рациональный подход к определению температурного режима для производственного цикла. Как известно [1], задача

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-08-00048).

Ильина Наталья Андреевна, аспирантка.

Рапопорт Эдгар Яковлевич, (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

определения оптимального процесса нагрева металлических изделий сводится к выбору управляющих воздействий (температура среды, тепловой поток, интенсивность внутреннего тепловыделения и др.), удовлетворяющих заданным условиям и ограничениям.

В случае определения оптимального температурного режима в нагревательных установках с внешним теплообменом (пламенные печи, электрические печи сопротивления) расчетные алгоритмы управления обязательно должны учитывать инерционные свойства управляющих воздействий, когда в реальных производственных условиях скорости изменения во времени температуры рабочего пространства печи или теплового потока на поверхности нагреваемого тела ограничиваются динамикой процессов внешнего теплообмена и «неспособностью» к мгновенному переключению управления, требуемому в условиях отсутствия таких ограничений.

Постановка задачи оптимального управления

В работе [2] предложена математическая модель динамического процесса внешнего теплообмена в отражательной печи камерного типа. Рассмотрим упрощенную по сравнению с предложенной в [2] математическую модель динамических процессов внешнего теплообмена в отражательной печи камерного типа, описываемую в первом приближении дифференциальными уравнениями первого порядка [3]:

$$\begin{aligned} T_1 \frac{dQ_1}{dt} + Q_1 &= k_1 u_1(t) - G_{п1}, \\ T_2 \frac{dQ_2}{dt} + Q_2 &= k_2 u_2(t) - G_{п2}, \end{aligned} \quad (1)$$

связывающими величины тепловых потоков Q_1 и Q_2 на нагреваемое тело с управляющими воздействиями $u_1(t)$ и $u_2(t)$ по мощности энергоносителя на соответствующих входах объекта.

В (1) T_1, T_2 – постоянные времени, характеризующие меру инертности объекта управления; k_1, k_2 – коэффициенты передачи; $G_{п1}, G_{п2}$ – потоки тепловых потерь.

Температурное поле нагреваемого тела в условиях равномерности его распределения по длине и ширине заготовки описывается в зависимости от пространственной координаты x по толщине пластины и времени t линейным пространственно-одномерным однородным уравнением теплопроводности с двумя граничными управляющими воздействиями следующего вида [3–4]:

$$\frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 Q(x,t)}{\partial x^2}, \quad x \in [0, R]; t \in [0, t_{кон}], \quad (2)$$

$$\begin{aligned} -\lambda \frac{\partial Q(0,t)}{\partial t} &= Q_1(t); \\ \lambda \frac{\partial Q(R,t)}{\partial t} &= Q_2(t). \end{aligned} \quad (3)$$

В (2)–(3) a – коэффициент температуропроводности; R – толщина пластины; λ – коэффициент теплопроводности.

Структурная схема объекта управления представлена на рис. 1.

Начальное температурное распределение принимается равномерным по всему объему пластины и, в частности, равным нулю:

$$Q(x, 0) = Q_0(x) = Q_0 = \text{const} = 0. \quad (4)$$

Граничные условия второго рода (3) характеризуются пренебрежением зависимости внешнего теплового потока от температуры поверхности нагреваемого тела и определяются только влиянием внешней среды, что характерно для нагрева тел в высокотемпературных печах. Мощности энергоносителя на входах объекта $u_1(t), u_2(t)$ при подобных краевых условиях в задачах управления процессом нагрева рассматриваются далее в качестве сосредоточенных граничных управляющих воздействий, каждое из которых на входе ограничивается некоторыми предельными значениями:

$$\begin{aligned} u_{1\min} &\leq u_1(t) \leq u_{1\max}; \\ u_{2\min} &\leq u_2(t) \leq u_{2\max}. \end{aligned} \quad (5)$$

Пример рассматриваемого случая двухканального нагрева приведен на рис. 2, где схематично изображена двухзонная нагревательная печь для нагрева металлических заготовок. Тепловой поток $Q_1(t)$ левой зоны и тепловой поток $Q_2(t)$ правой зоны, управлением которыми осуществляется нагрев металлической пластины до требуемой температуры, направлены на противоположные поверхности заготовки и могут быть различными по величине. Последнее уточнение приводит к тому, что широко распространенный в теории случай упрощения записи граничных условий за счет возможности симметричного характера нагрева при равенстве двух тепловых потоков $Q_1(t) = Q_2(t) = Q(t)$ не позволяет рассматривать процесс нагрева только в пределах половины толщины заготовки и не применим именно при двухканальном внешнем воздействии по обоим граничным условиям.

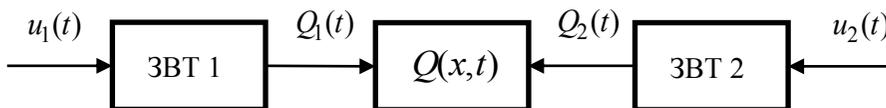


Рис. 1. Структурная схема объекта управления:
ЗВТ 1, ЗВТ 2 – звено внешнего теплообмена 1 и 2 соответственно

В момент $t_{\text{кон}}$ окончания процесса управления к результирующему температурному состоянию, как правило, предъявляется требование обеспечить заданную точность ε равномерного приближения к желаемому распределению температур $Q(x, t_{\text{кон}}) = Q^* = \text{const} > Q_0$:

$$\max_{x \in [0, R]} |Q(x, t_{\text{кон}}) - Q^*| \leq \varepsilon. \quad (6)$$

Требуется определить управляющие воздействия $u_1^*(t), u_2^*(t)$, переводящие объект управления (1–3) в требуемое конечное состояние (6) за минимально возможное время согласно критерию оптимальности

$$I = \int_0^{t_{\text{кон}}} dt = t_{\text{кон}} \rightarrow \min_{u_1(t), u_2(t)} \quad (7)$$

в условиях ограничений (5). Для решения рассматриваемой задачи могут быть использованы результаты, полученные в [5, 6].

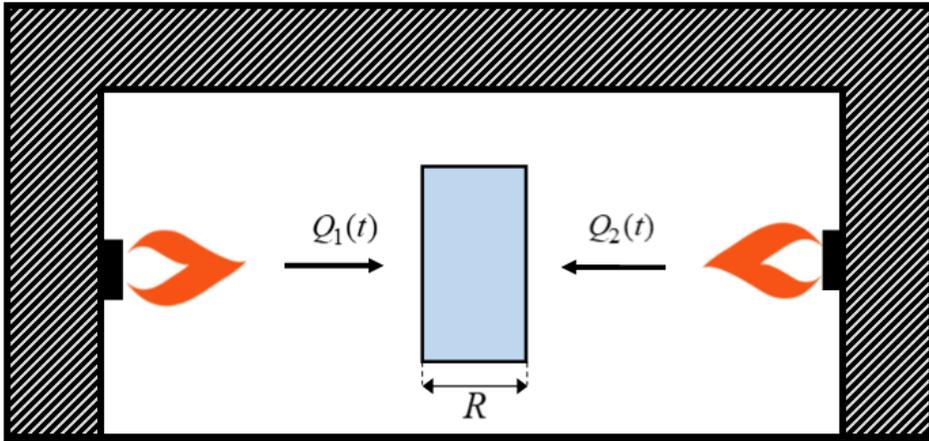


Рис. 2. Схематическая иллюстрация двухканального нагрева в нагревательной установке

Параметризация управляющих воздействий

Для параметризации управляющих воздействий применяется широко распространенный в подобных задачах принцип максимума Понтрягина [7–8], согласно которому в условиях ограничений на управляющие воздействия по двум независимым друг от друга каналам (5), определяющим предельные значения $u_i(t)$ заданными величинами $u_{i\min}$ и $u_{i\max}$, $i=1,2$, оптимальные алгоритмы $u_1^*(t), u_2^*(t)$, обеспечивающие выполнение требования (6) за минимально возможное время, согласно (7), представляют собой кусочно-постоянные функции времени, попеременно принимающие свои предельно допустимые значения в (5). В итоге проблема сводится к определению числа и длительностей $\Delta_i, i=1,2, \dots$ интервалов постоянства $u_1^*(t), u_2^*(t)$, где в пределах первого интервала, согласно ограничениям (5), здесь и далее принимается очевидное равенство $u_1^*(t) = u_{1\max}, u_2^*(t) = u_{2\max}$ в рассматриваемой задаче нагрева пластины до температуры $Q^* > Q_0 = 0$.

Будем рассматривать типичный режим [5–6] двухинтервального нагрева, при котором на первом интервале осуществляется нагрев заготовки с максимальной эффективностью, а на втором – с минимальной интенсивностью, согласно (5). Тогда имеем следующее выражение для алгоритма оптимального двухканального управления:

$$\begin{aligned}
u_1^*(\Delta_1^{(2)}, t) &= \frac{u_{1\max} + u_{1\min}}{2} + (-1)^{j+1} \frac{u_{1\max} - u_{1\min}}{2}, \Delta_1^{(2)} = \Delta_{1j}^{(2)}, \sum_{i=0}^{j-1} \Delta_{1i}^{(2)} < t < \sum_{i=0}^j \Delta_{1i}^{(2)}, j = \overline{1,2}, \Delta_{10} = 0; \\
u_2^*(\Delta_2^{(2)}, t) &= \frac{u_{2\max} + u_{2\min}}{2} + (-1)^{j+1} \frac{u_{2\max} - u_{2\min}}{2}, \Delta_2^{(2)} = \Delta_{2j}^{(2)}, \sum_{i=0}^{j-1} \Delta_{2i}^{(2)} < t < \sum_{i=0}^j \Delta_{2i}^{(2)}, j = \overline{1,2}, \Delta_{20} = 0.
\end{aligned} \tag{8}$$

Иллюстрацию управляющих воздействий при двухканальном режиме нагрева можно увидеть на рис. 3. Отметим, что действие обоих управляющих воздействий начинается и заканчивается одновременно, то есть длительности интервалов каждого из управлений стесняются условием равенства сумм этих интервалов $\Delta_{11}^{(2)} + \Delta_{12}^{(2)} = \Delta_{21}^{(2)} + \Delta_{22}^{(2)}$ для каждого из управлений, в связи с чем следует в качестве искомым величин рассматривать длительности только трех интервалов, например $\Delta_{11}^{(2)}, \Delta_{12}^{(2)}, \Delta_{21}^{(2)}$, а интервал нагрева минимальной интенсивности второго управления $\Delta_{22}^{(2)}$ определяется в функции этих значений $\Delta_{22}^{(2)} = \Delta_{11}^{(2)} + \Delta_{12}^{(2)} - \Delta_{21}^{(2)}$.

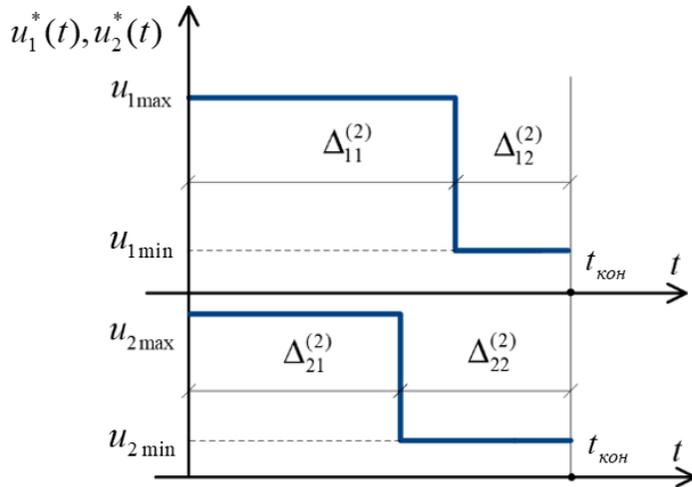


Рис. 3. Характер изменения управляющих воздействий в процессе нагрева

За счет инерционности процесса внешнего теплообмена, описываемого уравнениями (1), некоторое время продолжается нагрев пластины внешними тепловыми потоками, спадающими со скоростью, определяемой постоянными времени T_1 и T_2 в (1).

В этом случае параметрическая зависимость $Q(x, \Delta_{ij}^*, i, j = 1, 2)$, где Δ_{ij}^* соответствует оптимальному управлению, определяется подобно в [2] сверткой [9] известной импульсной переходной функции объекта (2)–(4) и внешнего теплового потока, определяемого решениями уравнений (1) при $u_1 = u_{1\max} \forall t \in [0, \Delta_{11}^{(2)}]$, $u_2 = u_{2\max} \forall t \in [0, \Delta_{21}^{(2)}]$ и $u_1 = u_{1\min} \forall t \in [\Delta_{11}^{(2)}, \Delta_{11}^{(2)} + \Delta_{12}^{(2)}]$, $u_2 = u_{2\min} \forall t \in [\Delta_{21}^{(2)}, \Delta_{21}^{(2)} + \Delta_{22}^{(2)}]$. В характерных условиях [2] $u_{1\min} = G_{п1} \approx 0$, $u_{2\min} = G_{п2} \approx 0$, $T_1 = T_2 = T$ эта зависимость принимает следующий вид [2, 6]:

$$\begin{aligned}
Q(x, \Delta_{11}^*, \Delta_{12}^*, \Delta_{21}^*) = & Q_0 + k \frac{R}{\lambda} \left[u_{1\max} \left(\Delta_{11}^* - \tau \left(e^{-\frac{\Delta_{12}^*}{\tau}} - e^{-\frac{\Delta_{11}^* + \Delta_{12}^*}{\tau}} \right) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot e^{-\pi^2 n^2 (\Delta_{11}^* + \Delta_{12}^*)} \cos(\pi n x) \cdot \right. \right. \\
& \left. \left. \left\{ \frac{1}{\pi^2 n^2} \left(e^{\pi^2 n^2 \Delta_{11}^*} - 1 \right) - \frac{1}{\pi^2 n^2 - \frac{1}{\tau}} \left[e^{\Delta_{11}^* \left(\pi^2 n^2 - \frac{1}{\tau} \right)} - 1 + \left(e^{\Delta_{11}^* \left(\pi^2 n^2 - \frac{1}{\tau} \right)} - e^{\left(\pi^2 n^2 - \frac{1}{\tau} \right) (\Delta_{11}^* + \Delta_{12}^*)} \right) \left(e^{\frac{\Delta_{11}^*}{\tau}} - 1 \right) \right] \right\} + \right. \\
& \left. + u_{2\max} \left(\Delta_{21}^* - \tau \left(e^{-\frac{(\Delta_{11}^* + \Delta_{12}^* - \Delta_{21}^*)}{\tau}} - e^{-\frac{\Delta_{11}^* + \Delta_{12}^*}{\tau}} \right) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot e^{-\pi^2 n^2 (\Delta_{11}^* + \Delta_{12}^*)} \cos(\pi n (R - x)) \cdot \right. \right. \\
& \left. \left. \left\{ \frac{1}{\pi^2 n^2} \left(e^{\pi^2 n^2 \Delta_{21}^*} - 1 \right) - \frac{1}{\pi^2 n^2 - \frac{1}{\tau}} \left[e^{\Delta_{21}^* \left(\pi^2 n^2 - \frac{1}{\tau} \right)} - 1 + \left(e^{\Delta_{21}^* \left(\pi^2 n^2 - \frac{1}{\tau} \right)} - e^{\left(\pi^2 n^2 - \frac{1}{\tau} \right) (\Delta_{11}^* + \Delta_{12}^*)} \right) \left(e^{\frac{\Delta_{21}^*}{\tau}} - 1 \right) \right] \right\} \right] \right], \quad (9)
\end{aligned}$$

где $\tau = aT / R^2$, $\Delta_{ij}^* = a\Delta_{ij}^{(2)} / R^2$, $i, j = 1, 2$.

Температурное поле $Q(x, t)$ в любой момент времени t рассчитывается по формуле (9), где следует принять для случая, иллюстрируемого на рис. 3, $\Delta_{11}^* = t$, $\Delta_{12}^* = 0$, $\Delta_{21}^* = t$ для $\forall t \in [0, \Delta_{21}^*]$; $\Delta_{11}^* = t$, $\Delta_{12}^* = 0$, $\Delta_{22}^* = t - \Delta_{21}^*$ для $\forall t \in [\Delta_{21}^*, \Delta_{11}^*]$ и $\Delta_{12}^* = t - \Delta_{11}^*$, $\Delta_{22}^* = t - \Delta_{21}^*$ для $\forall t \in [\Delta_{11}^*, \Delta_{11}^* + \Delta_{12}^*]$.

Редукция к задаче полубесконечной оптимизации

При полученном параметрическом представлении искомым управляющим воздействием (9) критерий оптимальности (7) в соответствии с рис. 2 определяется в виде простой суммы длительностей отдельных интервалов постоянства оптимального управления:

$$I = \Delta_{11}^{(2)} + \Delta_{12}^{(2)} = \Delta_{21}^{(2)} + \Delta_{22}^{(2)} \rightarrow \min, \quad (10)$$

а условие (6) оценки конечного распределения температур будет иметь вид

$$\max_{x \in [0, R]} |Q(x, \Delta_{11}^*, \Delta_{12}^*, \Delta_{21}^*) - Q^*| \leq \varepsilon, \quad \varepsilon > 0. \quad (11)$$

Здесь $Q(x, \Delta_{11}^*, \Delta_{12}^*, \Delta_{21}^*)$ определяется по формуле (9).

Таким образом, осуществляется переход от исходной задачи оптимального управления (ЗОУ) к задаче полубесконечной оптимизации (ЗПО) на минимум целевой функции (10) конечного числа переменных, которыми являются длительности $\Delta_{11}^*, \Delta_{12}^*, \Delta_{21}^*$ интервалов постоянства, с бесконечным числом ограничений (11), порождаемых требованием обеспечения заданной точности равномерного приближения во всех точках $x \in [0, R]$ [8]. Решение задачи полубесконечной оптимизации будет проводиться подходящим для рассматриваемой задачи альтернансным методом [10], который базируется на альтернансных свойствах конечного результирующего температурного состояния.

Решение ЗПО альтернансным методом

Как показано в работе [10], результирующее температурное поле оптимального по быстродействию процесса $Q(x, \Delta_{11}^*, \Delta_{12}^*, \Delta_{21}^*)$ отличается предельно допустимыми отклонениями, равными $\pm \varepsilon$, от желаемого температурного распреде-

ления Q^* в некоторых точках $x_i, i=1,2,\dots,R_x$ по объему тела, число R_x которых равно числу искомых параметров оптимального процесса, если $\varepsilon \geq \varepsilon_{\min}^{(3)}$, или превышает его на единицу, если $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(3)}$, где $\varepsilon_{\min}^{(3)}$ – минимально достижимое температурное отклонение от желаемой температуры в классе рассматриваемых ограничений:

$$\varepsilon_{\min}^{(3)} = \min_{\Delta_{11}^*, \Delta_{12}^*, \Delta_{21}^*} \left\{ \max_{x \in [0, R]} \left| Q(x, \Delta_{11}^*, \Delta_{12}^*, \Delta_{21}^*) - Q^* \right| \right\}.$$

При известной конфигурации пространственного температурного распределения $Q(x, \Delta_{11}^*, \Delta_{12}^*, \Delta_{21}^*)$, позволяющей установить характер и расположение точек $x_i, i=1,2,\dots,R_x$, соответствующая замкнутая система соотношений

$$\left| Q(x_i, \Delta_{11}^*, \Delta_{12}^*, \Delta_{21}^*) - Q^* \right| = \varepsilon, \quad i = \overline{1, R_x} \quad (12)$$

$$R_x = \begin{cases} s, & \varepsilon > \varepsilon_{\min}^{(3)}; \\ s+1, & \varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(3)} \end{cases} \quad (13)$$

может быть приведена к системе R_x уравнений с R_x неизвестными, в роли которых выступают $\Delta_{11}^*, \Delta_{12}^*, \Delta_{21}^*$, если в (13) принять $\varepsilon > \varepsilon_{\min}^{(3)}$. Здесь s – число свободно варьируемых параметров в составе $\Delta_{ij}^{(2)}$, $i, j = \overline{1, 2}$, равное трем в условиях одинаковой длительности процесса управления для обоих управляющих воздействий (см. рис. 3). Тогда, согласно отмеченному выше свойству (13), система должна состоять из $R_x = 3$ уравнений. Основное затруднение теперь состоит в том, что равенствам (12) формально соответствует множество вариантов по форме кривой пространственного распределения $Q(x, \Delta_{11}^*, \Delta_{12}^*, \Delta_{21}^*) - Q^*$ по ординате $x \in [0, R]$. Для перехода от равенств (12) к расчетной системе уравнений альтернативного метода нужно установить знаки разностей $Q(x, \Delta_{11}^*, \Delta_{12}^*, \Delta_{21}^*) - Q^*$ в каждом из уравнений и найти координаты точек $x_i, i=1,2,3$. Это можно сделать исходя из знаний предметной области о форме кривой $Q(x, \Delta_{11}^*, \Delta_{12}^*, \Delta_{21}^*) - Q^*$. Все возможные варианты формы кривой распределения конечной температуры по пространственной координате для задач, моделируемых одномерными уравнениями теплопроводности (2) с непосредственным управлением по тепловому потоку, установлены в работе [10] для одного канала управления. Для двухканального характера управления конфигурация $Q(x, \Delta_{11}^*, \Delta_{12}^*, \Delta_{21}^*) - Q^*$ будет являться результатом суперпозиции двух форм кривых для одноканального управления с учетом инерционности воздействий $Q_1(t)$ и $Q_2(t)$ в (1), которые при достаточно малых тепловых потерях G_{n_1} и G_{n_2} в типовом случае $\varepsilon > \varepsilon_{\min}^{(3)}$ отвечают условию $Q_1(x_i, t_{\text{кон}}) > 0$ и $Q_2(x_i, t_{\text{кон}}) > 0$ [2] (рис. 4).

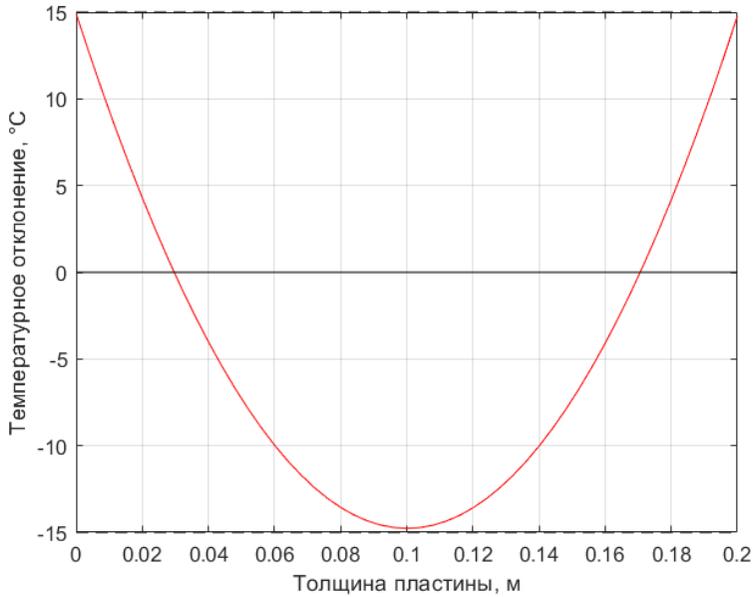


Рис. 4. Форма кривой конечного температурного распределения при двухканальном двухинтервальном управлении

Таким образом, в качестве точек, в которых может быть достигнуто максимальное температурное отклонение $\pm\varepsilon$, выступают поверхности нагреваемого тела $x_1 = 0$ и $x_3 = R$, а также точка минимума x_2 , лежащая внутри отрезка $[0, R]$.

Соответствующая система уравнений, получаемая из (12), дополняемая условием существования экстремума в точке x_2 и разрешаемая относительно четырех неизвестных $x_2, \Delta_{11}^*, \Delta_{12}^*, \Delta_{21}^*$, принимает следующий вид:

$$\begin{aligned}
 Q(0, \Delta_{11}^*, \Delta_{12}^*, \Delta_{21}^*) - Q^* &= \varepsilon; \\
 Q(x_2, \Delta_{11}^*, \Delta_{12}^*, \Delta_{21}^*) - Q^* &= -\varepsilon; \\
 Q(R, \Delta_{11}^*, \Delta_{12}^*, \Delta_{21}^*) - Q^* &= \varepsilon; \\
 \frac{\partial Q(x_2, \Delta_{11}^*, \Delta_{12}^*, \Delta_{21}^*)}{\partial x} &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

Дальнейшее решение системы (14) исчерпывает решение изначальной рассматриваемой задачи оптимального управления.

На рис. 4, рис. 5 и в табл. 3 представлены некоторые результаты расчета оптимального по быстродействию двухканального характера управления процессом нагрева неограниченной металлической пластины, полученные решением системы (14) с подстановкой в (9) исходных данных из табл. 1 и табл. 2 численным методом с помощью пакета Optimization Toolbox программы MATLAB [12–15]. Учитывались первые 30 членов бесконечного ряда в выражении (9).

На рис. 4 можно видеть график конечного температурного отклонения от желаемого температурного распределения при двухканальном двухинтервальном управлении, а рис. 5 демонстрирует динамику изменения температурного поля

во времени для трех точек: на поверхностях пластины $x_1 = 0$, $x_3 = R$ и x_2 , лежащая внутри отрезка $[0, R]$.

Таблица 1

Характеристики нагреваемой заготовки

Параметр	Значение
Материал заготовки	Титан
R , толщина заготовки, м	0,2
λ , коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °С)	14
k , коэффициент передачи	1
T , постоянная времени, сек	100
a , коэффициент температуропроводности, м ² /с	$4,34 \cdot 10^{-6}$

Таблица 2

Исходные данные для процесса нагрева

Параметр	Значение
Q_0 , начальная температура, °С	0
Q^* , конечная температура, °С	715
ε , допустимое температурное отклонение в конце оптимального процесса нагрева, °С	15
$u_{1\max}$, Ватт/м ²	$208 \cdot 10^3$
$u_{2\max}$, Ватт/м ²	$416 \cdot 10^3$

Таблица 3

Результаты численного решения системы (14)

Δ_{11}^* , сек	Δ_{12}^* , сек	Δ_{21}^* , сек	x_2 , м
1717	615	1205	0,1087

Остановимся на рис. 5, на котором можно заметить, что в начале второго интервала управления Δ_{12}^* , при котором происходит переключение на минимальную величину теплового потока $u_{1\min} \approx 0$, еще некоторое время (приблизительно 100 секунд) продолжается рост температуры в заданных условиях инерционности управляющих воздействий в (1). В работе [15] подобным методом решалась задача двухканального оптимального по быстродействию управления процессом нагрева аналогичной по теплофизическим и конструктивным параметрам заготовки, и можно убедиться, что без учета инерционности звена второй интервал управления сопровождается резким снижением температуры.

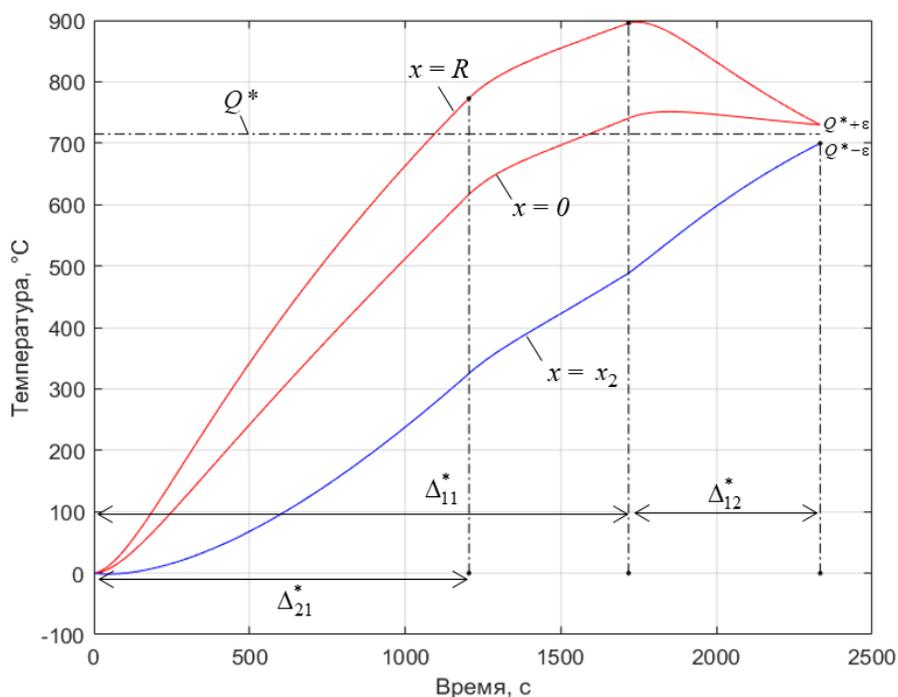


Рис. 5. Изменение температурного поля во времени для трех выбранных точек

В конце оптимального процесса температурное отклонение в трех точках $x_1 = 0$, $x_2 \in (0, R)$, $x_3 = R$ соответствует тем значениям, которые указаны на рис. 3: максимально допустимое превышение температуры над Q^* фиксируется на поверхностях пластины, а минимально допустимая температура – в точке, координата которой была найдена при решении системы уравнений (14).

Далее необходимо рассмотреть второй возможный вариант, для которого свободно варьируемыми параметрами в (13) являются длительности интервалов $\Delta_{21}^{(2)}, \Delta_{22}^{(2)}, \Delta_{11}^{(2)}$, а второй интервал первого управления определяется функцией этих параметров: $\Delta_{12}^{(2)} = \Delta_{21}^{(2)} + \Delta_{22}^{(2)} - \Delta_{11}^{(2)}$ (см. рис. 3). Формулы расчета используются аналогичные предыдущим. Результаты расчета второго варианта представлены в табл. 4 и на рис. 6–7. Сравнивая расчетные результаты обоих вариантов искомых параметров, можно сделать вывод, что оптимальное по быстродействию управление процессом нагрева неограниченной пластины достигается при первом варианте выбора искомых параметров управляющих воздействий.

Таблица 4

Результаты второго варианта численного решения системы (14)

Δ_{21}^* , сек	Δ_{22}^* , сек	Δ_{11}^* , сек	x_2 , м
1217	1112	1729	0,0849

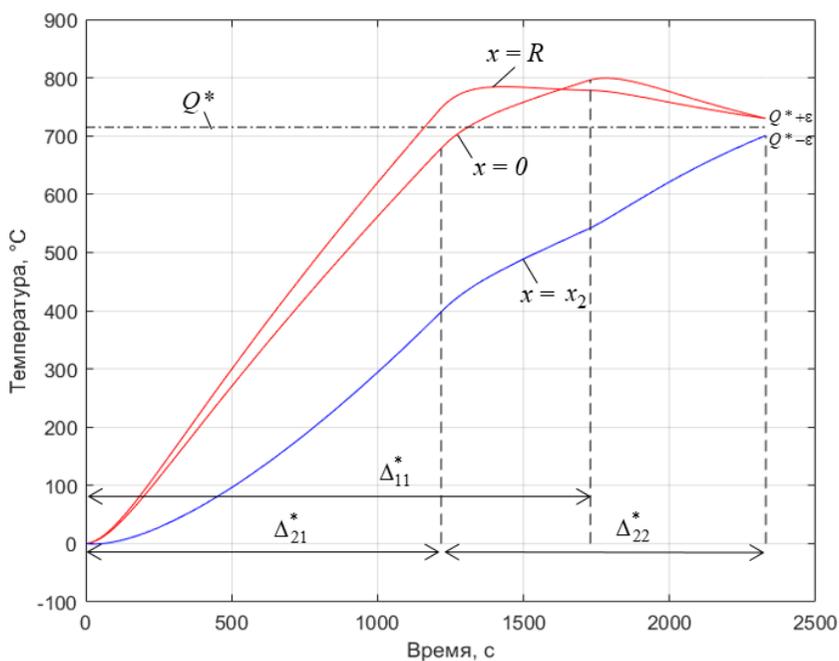


Рис. 6. Изменение температурного поля во времени для второго варианта выбора искомых параметров

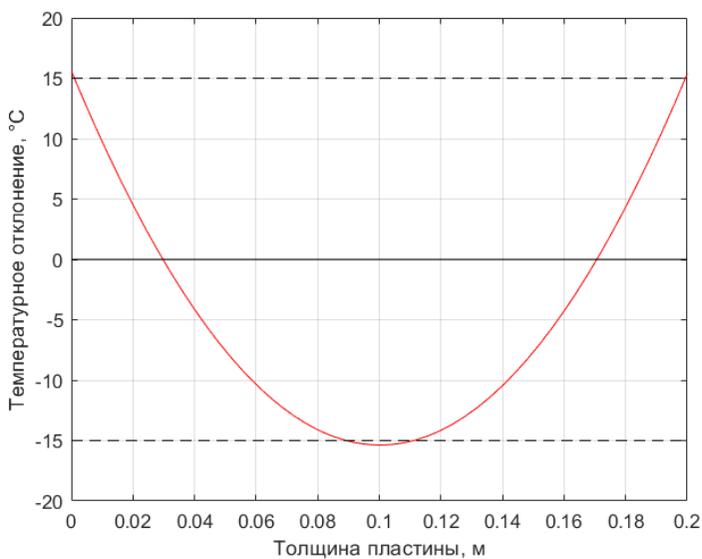


Рис. 7. Конечное температурное отклонение по пространственной координате для второго варианта выбора искомых параметров

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бутковский А.Г., Малый С.А., Андреев Ю.Н. Управление нагревом металла. – М.: Metallurgy, 1981. – 272 с.
2. Рапопорт Э.Я., Смирнова Л.Н. К задаче оптимального управления нагревом металла в печах с внешним теплообменом. – М.: Изв. вузов. Черная металлургия, 1984.
3. Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1975.
4. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.

5. Рапопорт Э.Я. Методы параметрической оптимизация в задачах многоканального управления системами с распределенными параметрами // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2019. – № 4. – С. 36–50.
6. Рапопорт Э.Я., Ильина Н.А. Двухканальное оптимальное по быстродействию управление процессом нестационарной теплопроводности // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – Самара: СамГТУ, 2018. – № 1(57). – С. 7–18.
7. Понтрягин Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко. – 2-е изд. – М.: Наука, 1969. – 384 с.
8. Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2009. – 677 с.
9. Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. – М.: Наука, 2012. – 309 с. – ISBN 978-5-02-037501-7 (в пер.).
10. Рапопорт Э.Я. Альтернативный метод в прикладных задачах оптимизации. – М.: Наука, 2000. – 336 с.
11. Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.
12. Потемкин В.Г. Введение в Matlab [Электронный ресурс]. – М.: Softline Co, 2001. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/ml/book1/index.php> (accessed March 02, 2019).
13. MATLAB.Эхпонента [Электронный ресурс]: Optimization Toolbox 2.2 Руководство пользователя / авт. А.Г. Трифонов. – Электрон. и текстовые данные. – Режим доступа: http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_1/ (accessed March 02, 2019).
14. MATLAB.Эхпонента [Электронный ресурс]: Введение в современные методы оптимизации систем управления. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/optimrobast/book1/index.php> (accessed February 10, 2019).
15. Ильина Н.А. Двухканальное оптимальное по быстродействию управление процессом индукционного нагрева с учетом фазового ограничения на максимальную температуру // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – Самара: СамГТУ, 2020. – № 65(2). – С. 41–58.

Статья поступила в редакцию 1 октября 2020 г.

TWO-CHANNEL TIME-OPTIMAL CONTROL OF NONSTATIONARY HEAT CONDUCTIVE PROCESS WITH ACCOUNT FOR RESPONSE TIME OF BOUNDARY CONTROL ACTIONS*

N.A. Ilina, E.Ya. Rapoport

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: ilina.natalyaa@yandex.ru, edgar.rapoport@mail.ru

Abstract. *The formulation and calculation method of time-optimal control algorithms of the heating process of an unlimited plate with two external concentrated control actions by the value of heat fluxes on its surfaces in a heating installation with extraneous heat exchange are proposed. The main feature of the problem is to take into account of response time of both control actions created by the dynamics of heat transfer processes in a furnace body. The problem is solved under the conditions of a given accuracy of uniform approximation of the final temperature distribution over the thickness of the plate to the required. The preliminary parameterization of control actions based on analytical optimality conditions in the form of the Pontryagin maximum principle is used. At the next stage reduction is performed to the problem of semi-infinite optimization, the solution of which is*

*Natalya A. Ilina, Graduate student.
Edgar Ya. Rapoport, Dr. Sci. (Techn.), Professor.*

found using the alternance method. The alternance properties of the final resulting temperature state at the end of the optimal process lead to a basic system of relations, which, if there is additional information about the shape of the temperature distribution curve, is reduced to a system of equations that can be solved. An example of solving the problem of two-channel time-optimal control of temperature field in furnaces with extraneous heat exchanger, results of solution and its analysis are carried out.

Keywords: optimal control, two-channel control, alternance method, semi-infinite optimization, heating furnace.

REFERENCES

1. Butkovskiy A.G., Malyy S.A., Andreev Yu.N. Upravlenie nagrevom metalla [Control of Metal Heating]. Moscow, Metallurgy Publ., 1981. 272 p. (In Russian).
2. Rapoport E.Ya., Smirnova L.N. K zadache optimal'nogo upravleniya nagrevom metalla v pechakh s vneshnim teploobmenom [On the problem of optimal control of metal heating in furnaces with external heat exchange]. – Moscow: Izv.vuz. Chernaya metallurgiya, 1984. (In Russian).
3. Butkovskiy A.G. Metody upravleniya sistemami s raspredelennymi parametrami [Control methods of systems with distributed parameters]. – Moscow: Nauka, 1975 (In Russian).
4. Lykov A.B. Teoriya teploprovodnosti [Theory of heat conduction]. – Moscow: Vyssh. Shkola, 1967. 600 p. (In Russian).
5. Rapoport E.Ya. Metody parametriceskoy optimizatsii v zadachakh mnogokanal'nogo upravleniya sistemami s raspredelennymi parametrami [Parametric optimization methods for multi-channel control of systems with distributed parameters] // Izvestiya RAN. Teoriya i sistemami upravleniya, 2019. – № 4. Pp. 36–50. (In Russian).
6. Rapoport E.Ya., Il'ina N.A. Dvukhkanal'noe optimal'noe po bystrodeystviyu upravlenie protsessom nestatsionarnoy teploprovodnosti [Two-channel time-optimal control of the process of nonstationary heat conductivity] // Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Un-ta. Ser. Tekhn. Nauki. – Samara, 2018. no. 1(57). Pp. 7–18. (In Russian).
7. Pontryagin L.S., Boltyanskiy V.G., Gamkrelidze R.V., Mischenko E.F. Matematicheskaya teoriya optimalnykh protsessov [Mathematical theory of optimal processes]. Moscow, Nauka, 1969. 384 p. (In Russian).
8. Rapoport E.Ya. Optimal'noe upravlenie sistem s raspredelennymi parametrami [Optimal Control for Systems with Distributed Parameters]. Moscow, Vyssh. Shkola, 2009. 677 p. (In Russian).
9. Rapoport E.Ya., Pleshivtseva Yu.E. Optimal'noe upravlenie temperaturnumi regimami induktsionnogo nagreva [Optimal Control of Induction Heating Processes]. – Moscow: Nauka, 2012. 309 p. – ISBN 978-5-02-037501-7 (In Russian).
10. Rapoport E.Ya. Al'ternansnyy metod v prikladnykh zadachakh optimizatsii [Alternance Method for Solving Applied Optimization Problems]. Moscow, Nauka, 2000. 336 p. (In Russian).
11. Dyakonov V.P. MATLAB. Polnuy samouchitel' [MATLAB.Full tutorial]. Moscow, DMK Press, 2012. 768 p. (In Russian).
12. Potemkin V.G. Vvedenie v Matlab [Introduction to Matlab]. Moscow, Softline Co, 2001. <http://matlab.exponenta.ru/ml/book1/index.php> (accessed March 02, 2019).
13. Optimization Toolbox 2.2 Rukovodstvo pol'zovatelya [Optimization Toolbox 2.2 User manual] http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_1/. (accessed March 02, 2019).
14. MATLAB.Exponenta Vvedenie v sovremennyye metody optimizatsii sistem upravleniya [Introduction to modern methods of control systems optimization]. <http://matlab.exponenta.ru/optimrobast/book1/index.php> (accessed February 10, 2019).
15. Il'ina N.A. Dvukhkanal'noe optimal'noe po bystrodeystviyu upravlenie protsessom induktsionnogo nagreva s uchedom fazovogo ogranicheniya na maksimal'nuyu temperaturu [Two-channel time-optimal control of induction heating process with maximum temperature constraint] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya Tekhnicheskkiye nauki. – Samara: SamGTU, 2020. – № 65(2). Pp. 41–58.

УДК 681.51

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖАНИЯ КАЧЕСТВА ПРОМЫСЛОВОЙ ПОДГОТОВКИ НЕФТИ С ИДЕНТИФИЦИРУЕМОЙ МОДЕЛЬЮ

С.Б. Коныгин, Д.В. Коноваленко, Д.А. Крючков

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы создания адаптивной системы поддержания качества промышленной подготовки нефти. В основе предложенной системы лежит математическая модель процесса подготовки нефти, позволяющая прогнозировать показатели качества товарной продукции. Для предотвращения отклонения показателей качества товарной нефти от нормативных значений система прогнозирует новые значения параметров технологического режима и время их корректировки. Математическая модель процесса реализована в программном продукте для моделирования и расчета процессов и аппаратов «МиР ПИА Процесс». В предложенной системе постоянно корректируется математическая модель на основании данных информационно-измерительной аппаратуры о реальном режиме работы установки, а также периодических результатов лабораторных анализов.

Ключевые слова: промышленная подготовка нефти, автоматизированная система управления, моделирование процесса подготовки нефти.

Одной из актуальных проблем промышленной подготовки нефти является то, что в определенные периоды времени не удается получить товарную нефть, соответствующую нормативным требованиям. К основным причинам можно отнести изменение состава и расхода исходной сырой нефти, меняющиеся погодные условия и различные нарушения в работе оборудования [1]. Все это приводит к необходимости постоянной корректировки режима работы установки подготовки нефти (УПН) [2]. Однако поиск необходимых значений параметров режима сопряжен с проведением большого количества сложных технологических расчетов [3–5], что затруднительно в условиях промысла.

Ранее в работах [6–7] было предложено одно из решений, способное оказать персоналу УПН поддержку в поиске новых значений параметров технологического режима. Данная статья является развитием этого решения. В ней рассматривается создание адаптивной системы поддержания качества (АСПК) подготовки нефти к транспортировке. АСПК представляет собой специализированную компьютерную программу, которая интегрируется в действующую АСУТП установки. Ее целью является прогнозирование значений давления насыщенных па-

Коныгин Сергей Борисович (д.т.н., доцент), заведующий кафедрой «Машины и оборудование нефтегазовых и химических производств».

Коноваленко Денис Владимирович, старший преподаватель кафедры «Машины и оборудование нефтегазовых и химических производств».

Крючков Дмитрий Александрович (к.т.н.), доцент кафедры «Машины и оборудование нефтегазовых и химических производств».

ров (ДНП) и содержания сероводорода в товарной нефти и выдача рекомендаций по корректировке режима работы УПН в случае их отклонения от нормативных значений.

Технологическая схема процесса подготовки представлена на рис. 1. Сырая нефть проходит три ступени сепарации С1, С2, С3, на которых последовательно понижается давление. В результате из нее удаляется попутный нефтяной газ, содержащий сероводород. Для доведения ДНП нефти до нормативного значения перед третьей ступенью сепарации С3 предусмотрен ее нагрев в теплообменниках Т1 и Т2. Теплообменник Т1 служит для предварительного подогрева за счет рекуперации тепла. Окончательный нагрев нефти в Т2 производится с помощью промежуточного теплоносителя, приходящего из печи П1. Повышение температуры также улучшает процесс отстаивания воды в отстойнике О1. Оставшийся сероводород нейтрализуется химическим реагентом, подаваемым насосом Н1 в емкость Е1.

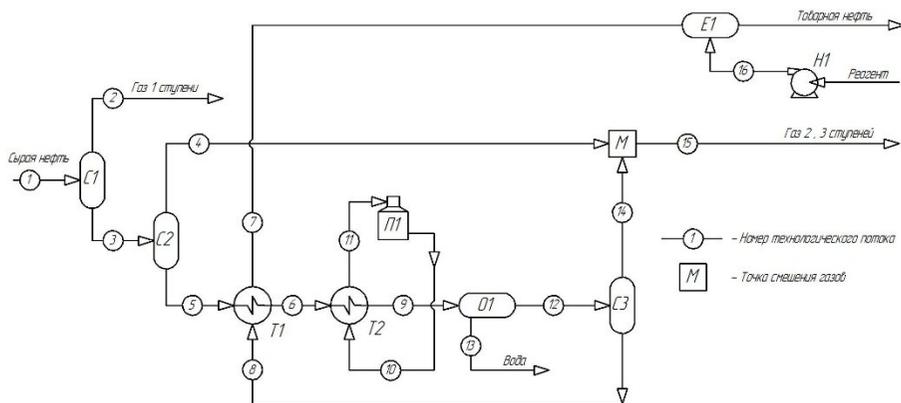


Рис. 1. Схема технологического процесса подготовки нефти

Схема интеграции АСПК в систему сбора и подготовки нефти показана на рис. 2. Объектом управления является технологический процесс подготовки нефти. Его спецификой является то, что показатели качества целевой продукции не могут быть измерены непосредственно в ходе процесса, а определяются в химических лабораториях. Поэтому управление процессом по отклонению этих параметров от нормативных значений в настоящее время не представляется возможным.

В этой связи предлагаемая АСПК представляет собой систему управления по возмущающим воздействиям. Непосредственно измеряемыми параметрами возмущающих воздействий являются значения расходов нефти Q_q ($q = \overline{1, N_q}$ – номер скважины, N_q – общее количество скважин), поступающие с групповых замерных установок (ГЗУ). Возмущающие воздействия со стороны окружающей среды и изменения эффективности работы оборудования могут быть косвенно отражены реальными значениями непосредственно измеряемых параметров технологического режима. Для сепаратора С1 такими параметрами являются температура T_3 , давление P_2 и расход G_2 выходящих потоков (индексы соответствуют номерам потоков на рис. 1). Аналогично для сепараторов С2 и С3 такими параметрами будут T_5, P_4, G_4 и T_8, P_{14}, G_{14} соответственно. Для теплообменников Т1 и Т2 это температуры выходящих потоков T_6, T_7 и T_9, T_{11} соответственно.

Химические составы пластовых нефтей $\bar{x}_q = (x_{q1}, x_{q2}, \dots, x_{qn_j})$ (N_j – количество веществ в химическом составе) очень медленно изменяются с течением времени, поэтому принимаются в АСПК постоянными. Однако при необходимости их значения могут быть скорректированы в процессе работы АСПК (например, при вводе в эксплуатацию новых скважин).

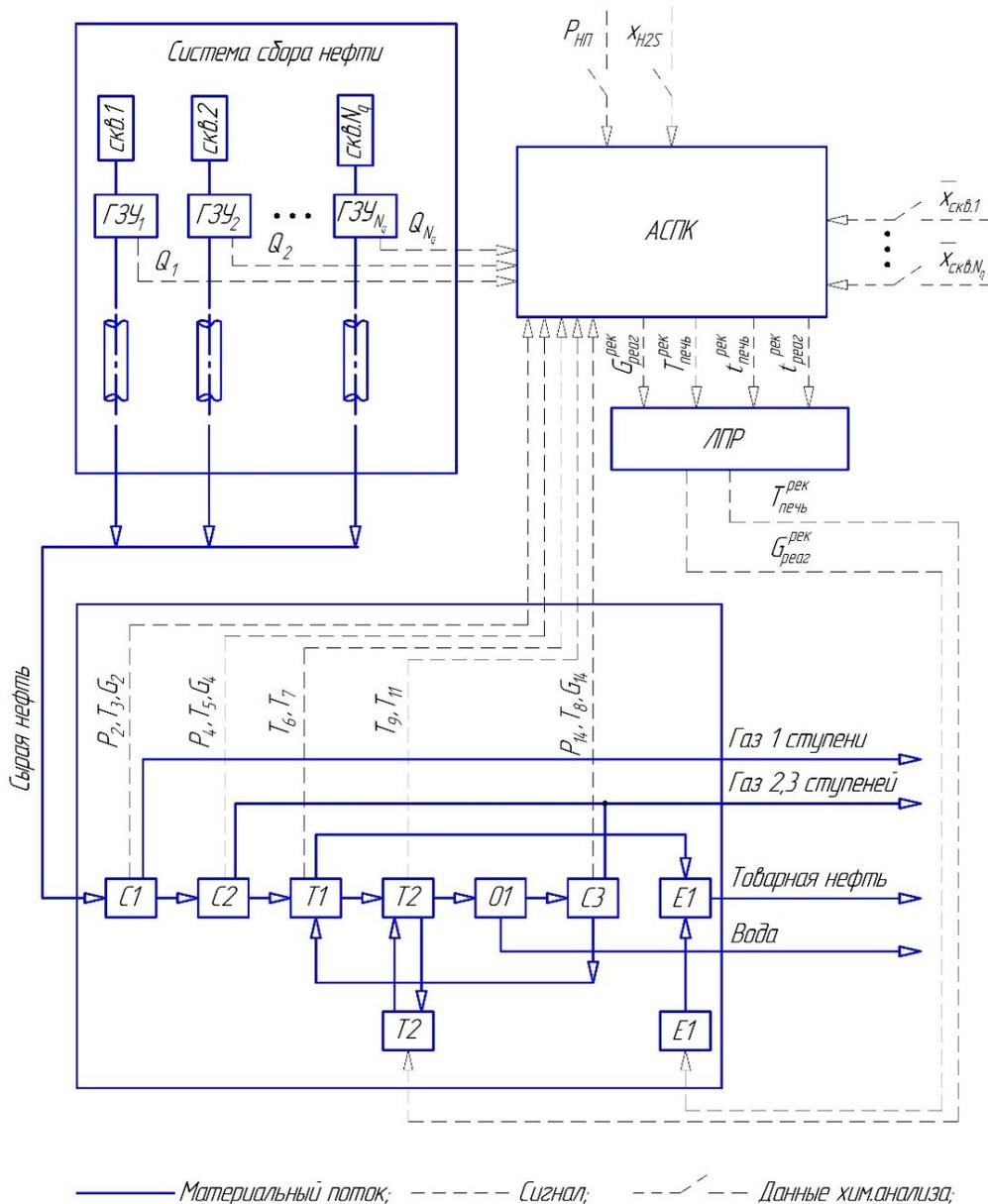


Рис. 2. Схема интеграции АСПК в систему сбора и подготовки нефти

Данные по показателям качества товарной нефти (давление насыщенных паров нефти и содержание сероводорода x_{H2S}), периодически получаемые из химических лабораторий, вносятся в АСПК и используются для уточнения параметров математической модели.

АСПК работает в непрерывном режиме и в зависимости от сложности установки и быстродействия компьютера предлагает лицу, принимающему решение (ЛПР), результаты своей работы с периодичностью в несколько минут.

Особенностью объекта управления является его линейная технологическая структура, т. е. в нем поток нефти движется последовательно от входа к выходу (без рециклов и т. п.). Таким образом, работу объекта управления можно условно представить в виде некоего конвейера, а поступающий в него непрерывный поток нефти – в виде последовательности порций определенного состава. При этом каждая порция нефти последовательно проходит ряд операций: отделение газа, нагрев, отделение воды, отделение газа и нейтрализация сероводорода. Поэтому работа АСПК может быть сведена к определению двух групп параметров:

1) параметры режима (при поступлении порции нефти на каждую операцию в ней должны быть созданы определенные термобарические условия, совокупность которых обеспечит качество готовой продукции);

2) временные параметры (УПН должна успевать изменить термобарические условия в каждом аппарате к моменту поступления в него новой порции нефти другого состава).

Разработанная АСПК выдает рекомендации для ЛПР по температуре теплоносителя на выходе из печи $T_{печь}^{рек}$ и расходу реагента для нейтрализации сероводорода $G_{реаг}^{рек}$. Значения давлений на ступенях сепарации поддерживаются соответствующими подсистемами стабилизации имеющейся АСУТП на уровне регламентных значений и не меняются с течением времени. Процесс сепарации является адиабатическим, поэтому каждому составу поступающей порции нефти будет соответствовать вполне определенное значение температуры теплоносителя и расхода реагента. Они могут быть определены с помощью математической модели, описывающей квазистационарный процесс подготовки нефти данного состава.

В ходе оценки временных параметров АСПК, во-первых, прогнозирует составы поступающей нефти $\bar{x}_{сум}^{расч}$ и соответствующие показатели качества готовой продукции $R_{ин}^{расч}$ и $x_{H_2S}^{расч}$ с упреждением на некоторое время. Для этого АСПК по модели квазистационарного процесса выполняет ряд расчетов на ожидающиеся в ближайшее время составы нефти. Исходя из этих прогнозов ЛПР имеет возможность по своему запросу получить от АСПК рекомендуемые значения параметров технологического режима $T_{печь}^{рек}$ и $G_{реаг}^{рек}$ для любой ожидающейся порции нефти для времени $t_{выбр}$.

Во-вторых, АСПК определяет время внесения этих изменений ($t_{печь}^{рек}$ и $t_{реаг}^{рек}$) в технологический режим. В силу того, что [8]:

1) изменение расходов нефти, поступающей на установку, как правило, происходит не чаще, чем раз в сутки;

2) влияние погодных условий характеризуется преимущественно суточной периодичностью (день/ночь);

3) диапазон изменений температур теплоносителя, как правило, находится в пределах 10 °С, что позволяет достаточно быстро менять режим, примем допущение пренебрежимо малой инерционности системы подачи реагента и малой инерционности конура нагрева теплоносителя в сравнении с временами изменения возмущающих параметров.

Исходя из вышесказанного алгоритм для ЛПР строим следующим образом.

При отсутствии резких изменений расходов добываемой нефти производится постоянная корректировка технологического режима на основании прогноза на время, равное длительности разогрева контура теплоносителя. За это время существенного изменения параметров работы технологического оборудования не произойдет.

Кроме этого, постоянно анализируется прогноз работы системы сбора нефти на более длительный период времени. При появлении резких изменений добычи нефти оценивается запас времени до момента, когда будет требоваться смена режима. В течение этого периода принимается решение о необходимости реагирования на данные изменения (например, кратковременные отклонения могут быть проигнорированы). Кроме того, значения новых параметров технологического режима постоянно уточняются АСПК по мере приближения нефти другого состава к УПН.

Схема АСПК промышленной подготовки нефти показана на рис. 3. Данные о расходах Q_q с ГЗУ поступают в модуль смешения нефтей идентифицируемой математической модели (ИММ). На их основании рассчитывается мольный расход $G_{\text{сум}}^{\text{расч}}$ и состав $\bar{x}_{\text{сум}}^{\text{расч}}$ поступающей на подготовку суммарной нефти, которые передаются в расчетный модуль технологического процесса ИММ. В него же поступают данные о текущих значениях параметров технологического режима ($P_2, T_3, G_2, P_4, T_5, G_4, P_{14}, T_8, G_{14}, T_6, T_7, T_9, T_{11}$). На их основе прогнозируются показатели качества готовой продукции: давление насыщенных паров $P_{\text{нп}}^{\text{расч}}$ и содержание сероводорода $x_{\text{H}_2\text{S}}^{\text{расч}}$.

Эти данные поступают в режимный модуль ИММ для сравнения с нормативными значениями $P_{\text{нп}}^{\text{норм}}$ и $x_{\text{H}_2\text{S}}^{\text{норм}}$. В случае их отклонения определяются новые значения управляющих параметров: температуры теплоносителя на выходе из печи $T_{\text{печь}}^{\text{рек}}$ и расхода реагента для нейтрализации сероводорода $G_{\text{реаг}}^{\text{рек}}$. В этом же модуле определяются времена внесения изменений в режим работы установки $t_{\text{печь}}^{\text{рек}}$ и $t_{\text{реаг}}^{\text{рек}}$. В конечном итоге вся информация передается персоналу УПН, который принимает решение и вносит необходимые изменения в технологический процесс с помощью действующей системы АСУТП.

При периодическом появлении новых результатов лабораторных анализов качества товарной нефти $P_{\text{нп}}$ и $x_{\text{H}_2\text{S}}$ и их отклонения от расчетных значений модули идентификации $\gamma_{\text{C}_1\text{-C}_4}$ и $\gamma_{\text{H}_2\text{S}}$ проводят корректировку поправочных коэффициентов (см. ниже).

Описанный алгоритм работы АСПК представлен на рис. 4.

Особенностью модуля смешения нефтей ИММ является то, он отражает различное удаление нефтедобывающих скважин от УПН и смешение в трубопроводах системы сбора потоков добытой жидкости в различных сочетаниях. В этой связи для прогнозирования состава и расхода суммарной сырой нефти необходимо учитывать задержки $\tau_{\text{сбор}}$, связанные с движением жидкости по трубопроводам [9].

Для анализа система сбора нефти представляется в виде бинарного дерева, т. е. в каждый трубопровод нефть поступает из двух предыдущих трубопроводов (см. рис. 5). В этом случае расчет процесса смешения для системы сбора в целом может быть сведен к рекурсивному расчету смешения потоков в элементе, представленном на рис. 6.

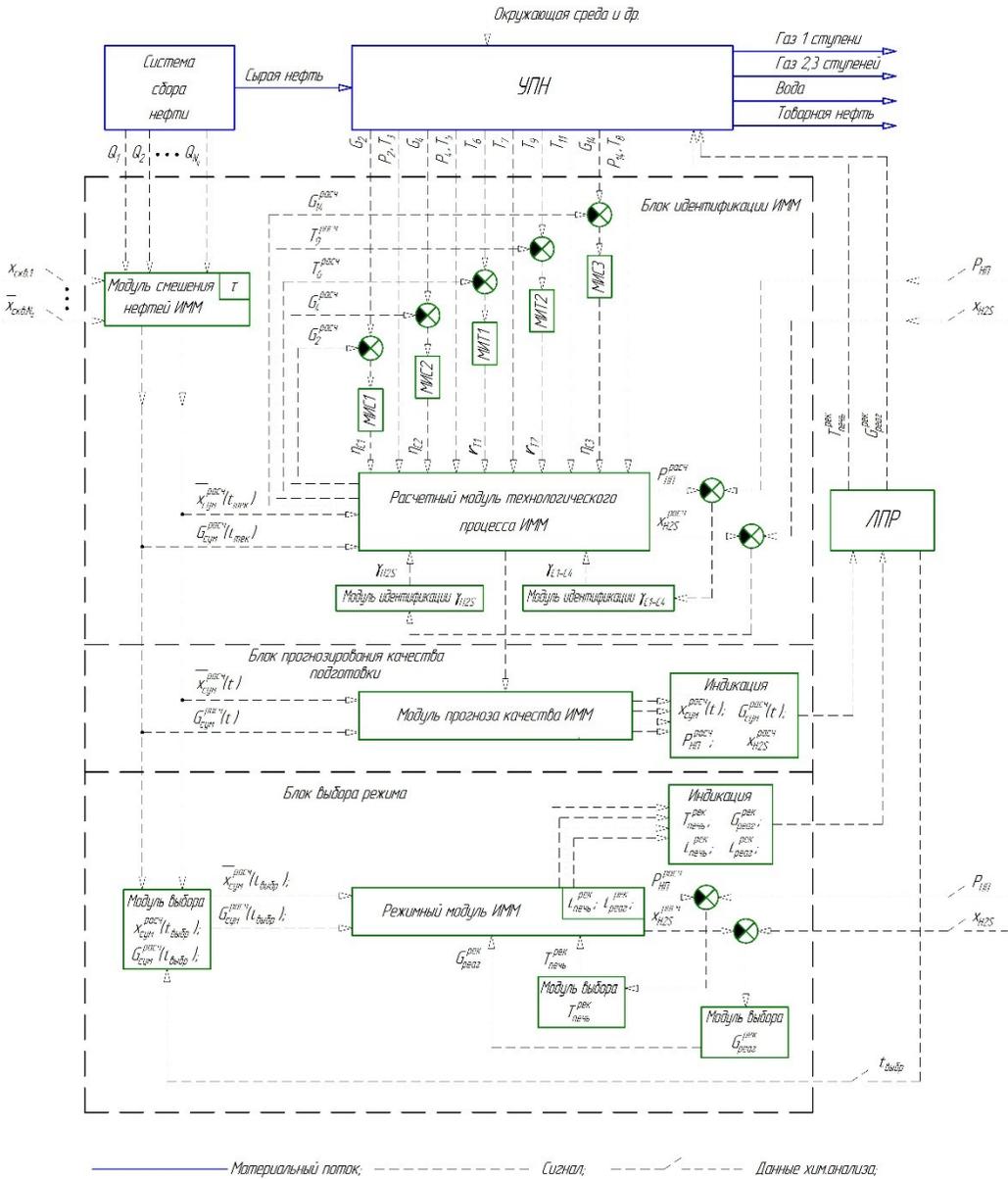


Рис. 3. Схема АСПК промышленной подготовки нефти:

$t_{тек}$ – текущий момент времени; $t_{выбр}$ – выбранный ЛПР момент времени;
 МИС1, МИС2, МИС3 – модули идентификации параметров сепараторов С1, С2, С3;
 МИТ1, МИТ2 – модули идентификации параметров теплообменников Т1, Т2

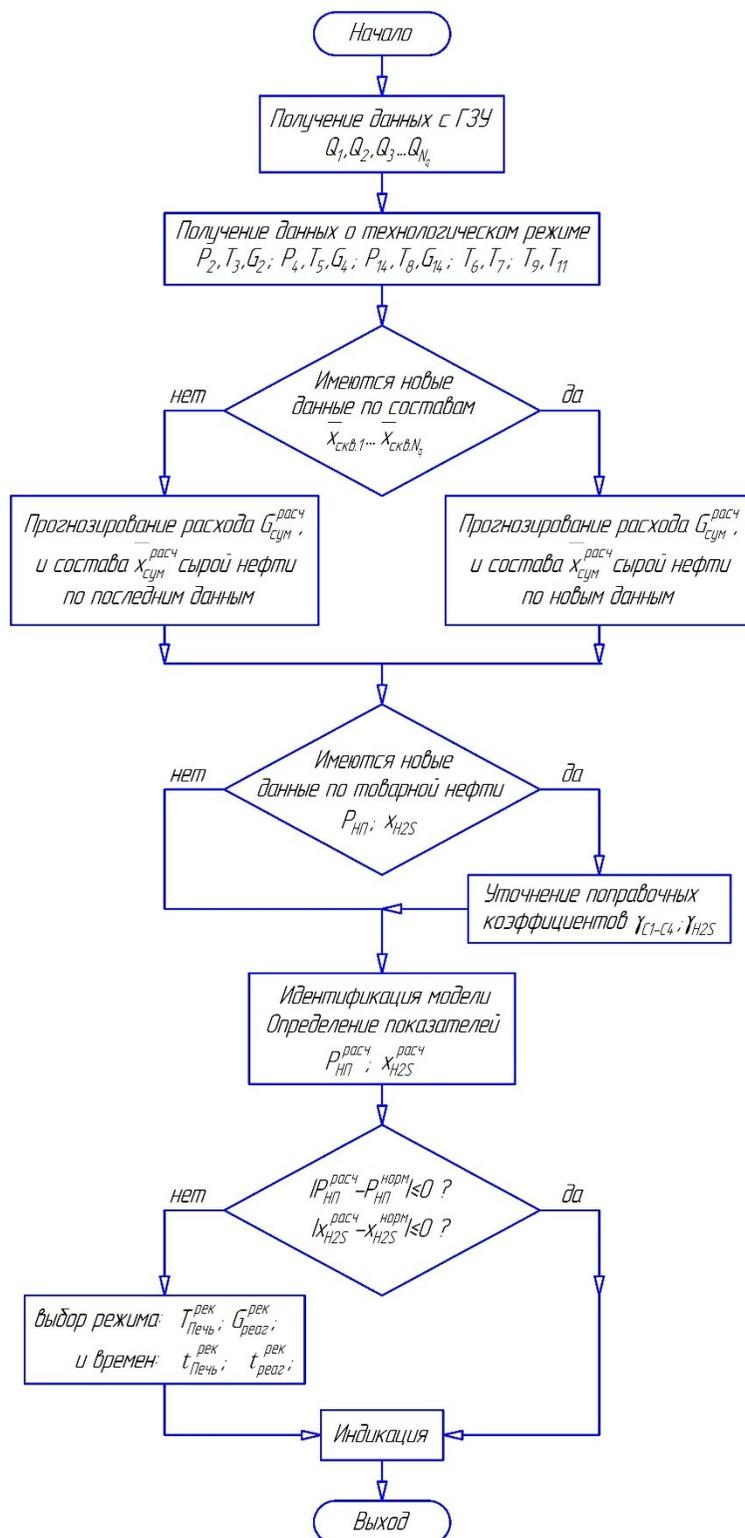


Рис. 4. Алгоритм работы АСПК

Для расчетного элемента объемный расход жидкости на выходе будет равен

$$Q_{mp}(t) = Q_{mp1}(t) + Q_{mp2}(t). \quad (1)$$

Время задержки $\tau_{сбор}$, затрачиваемое на прохождение жидкости по трубопроводу, определяется из интегрального уравнения, описывающего процесс заполнения трубопровода объемом V_{mp} :

$$V_{mp} = \int_{t-\tau_{сбор}}^t [Q_{mp1}(t) + Q_{mp2}(t)] dt. \quad (2)$$

Так как расходы входящих потоков нефти $Q_{mp1}(t)$ и $Q_{mp2}(t)$ являются положительными величинами, то уравнение (2) всегда имеет единственное решение.

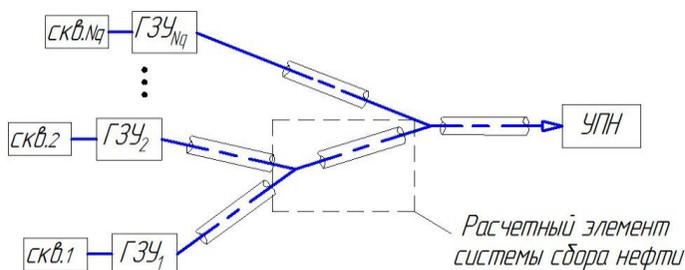


Рис. 5. Расчетная схема бинарного дерева системы сбора нефти

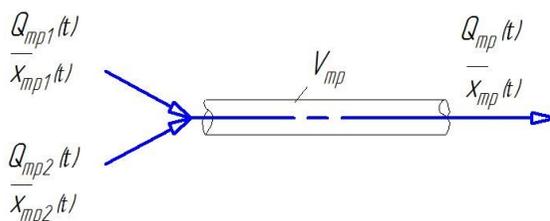


Рис. 6. Расчетный элемент системы сбора нефти

Вычисленное из (2) время $\tau_{сбор}$ задержки (для каждого трубопровода оно свое) позволяет определить состав потока, выходящего из трубопровода в момент времени t :

$$\bar{x}_{mp}(t) = \frac{Q_{mp1}(t - \tau_{сбор}) \bar{x}_{mp1}(t - \tau_{сбор}) + Q_{mp2}(t - \tau_{сбор}) \bar{x}_{mp2}(t - \tau_{сбор})}{Q_{mp1}(t - \tau_{сбор}) + Q_{mp2}(t - \tau_{сбор})}. \quad (3)$$

В формуле (3) химический состав выражен в объемных долях веществ в жидкости. После завершения расчета процесса смешения он переводится в мольные доли.

Для трубопроводов, в которых не происходит смешения, а поступает нефть со скважины, для расчета принимается $Q_{mp2}(t) = 0$. Суммарные расход $G_{сум}^{расч}$ и состав $\bar{x}_{сум}^{расч}$ сырой нефти будут равны расходу и составу потока, выходящего из корневого трубопровода.

ИММ технологического процесса связывает показатели качества товарной нефти с параметрами исходного сырья и режима работы технологического оборудования:

$$P_{nn}^{расч} = P_{nn}^{расч}(G_{сум}^{расч}, \bar{x}_{сум}^{расч}, P_2, T_3, G_2, P_4, T_5, G_4, P_{14}, T_8, G_{14}, T_6, T_7, T_9, T_{11}), \quad (4)$$

$$x_{H2S}^{расч} = x_{H2S}^{расч}(G_{сум}^{расч}, \bar{x}_{сум}^{расч}, P_2, T_3, G_2, P_4, T_5, G_4, P_{14}, T_8, G_{14}, T_6, T_7, T_9, T_{11}). \quad (5)$$

Она базируется на материальных и тепловых балансах, фазовых равновесиях и теплопередаче. Общая модель технологического процесса включает модели всех аппаратов, участвующих в нем.

Математическая модель сепаратора определяет расходы G_m , G_n и составы \bar{x}_m , \bar{x}_n выходящих из него газа и жидкости в зависимости от условий в нем:

$$G_k = G_m + G_n; \quad (6)$$

$$G_k \cdot x_{kj} = G_m \cdot x_{mj} + G_n \cdot x_{nj}; \quad (7)$$

$$G_k \cdot H_k = G_m \cdot H_m(T_m, P_m) + G_n \cdot H_n(T_n, P_n); \quad (8)$$

$$G_m = e_i \cdot G_k; \quad (9)$$

$$G_n = (1 - e_i) \cdot G_k; \quad (10)$$

$$\phi_j = \frac{x_{mj}}{x_{nj}} = \gamma_j \cdot \eta_i \cdot \frac{f_{nj}(T_n, P_n)}{f_{mj}(T_m, P_m)}; \quad (11)$$

$$\sum_j \frac{x_j}{1 + e_i \cdot (\phi_j - 1)} = 1, \quad (12)$$

где H_k , H_m , H_n – энтальпии потоков;

e_i – мольная доля газа;

ϕ_j – константы фазового равновесия веществ;

f_{nj}, f_{mj} – фугитивности веществ;

η_i – испарительный КПД;

γ_j – поправочные коэффициенты;

i – номер аппарата;

j – номер вещества;

k, m, n – номера потоков (см. рис. 1).

Для сепаратора С1: $i=1, k=1, m=2, n=3$, для сепаратора С2: $i=2, k=3, m=4, n=5$, для сепаратора С3: $i=3, k=12, m=14, n=8$.

Математическая модель теплообменника [10] связывает температуры T_m , T_u выходных потоков с тепловой нагрузкой E аппарата:

$$G_k = G_m; \quad (13)$$

$$G_k \cdot x_{kj} = G_m \cdot x_{mj}; \quad (14)$$

$$G_k \cdot H_k(T_k, P_k) + E_i = G_m \cdot H_m(T_m, P_m); \quad (15)$$

$$G_n = G_u; \quad (16)$$

$$G_n \cdot H_n(T_n, P_n) - E_i = G_u \cdot H_u(T_u, P_u); \quad (17)$$

$$G_n \cdot x_{nj} = G_u \cdot x_{uj}; \quad (18)$$

$$E_i = K_i(r_i) \cdot F_i \cdot \Delta T_i, \quad (19)$$

где K – коэффициент теплопередачи;

r – термическое сопротивление загрязнений;

F – поверхность теплообмена;

ΔT – средняя разность температур;

i – номер аппарата (см. ниже);

k, m, n, u – номера потоков (см. ниже и рис. 1).

Для теплообменника Т1: $i=1, k=6, m=5, n=7, u=8$, для теплообменника Т2: $i=2, k=6, m=9, n=10, u=11$.

Математическая модель отстойника определяет расходы и составы выходящих из него жидкостей:

$$G_n = G_k \cdot x_{k\beta}; \quad (20)$$

$$G_m = G_k - G_n; \quad (21)$$

$$x_{nj} = \begin{cases} 1, npij = \beta; \\ 0, npij \neq \beta; \end{cases} \quad (22)$$

$$x_{mj} = \begin{cases} \frac{x_{kj} \cdot G_k}{G_m}, npij \neq \beta; \\ 0, npij = \beta; \end{cases} \quad (23)$$

$$G_m \cdot H_m(T_m, P_m) = G_k \cdot H_k(T_k, P_k) - G_n \cdot H_n(T_n, P_n); \quad (24)$$

где β – номер вещества H_2O . Для отстойника О1: $k=9, m=12, n=13$ (см. рис. 1).

Математическая модель точки смешения газов сепарации определяет расход и состав суммарного газа:

$$G_k = G_m + G_n; \quad (25)$$

$$G_k \cdot x_{kj} = G_m \cdot x_{mj} + G_n \cdot x_{nj}; \quad (26)$$

$$G_k \cdot H_k(T_k, P_k) = G_m \cdot H_m(T_m, P_m) + G_n \cdot H_n(T_n, P_n). \quad (27)$$

Для точки смешения М: $k=15, m=4, n=14$ (см. рис. 1).

Математическая модель печи связывает параметры входного и выходного потоков теплоносителя и тепловую мощность:

$$G_k = G_m; \quad (28)$$

$$G_k \cdot x_{kj} = G_m \cdot x_{mj}; \quad (29)$$

$$x_{mj} = \begin{cases} 1, npij = \beta; \\ 0, npij \neq \beta; \end{cases} \quad (30)$$

$$E_i = G_k \cdot H_k(T_k, P_k) - G_m \cdot H_m(T_m, P_m). \quad (31)$$

Для печи П1: $i=1, k=10, m=11$ (см. рис. 1).

Математическая модель емкости нейтрализации определяет необходимый расход реагента для очистки от сероводорода:

$$G_n = \psi_i G_k \cdot x_{k\xi}, \quad (32)$$

где ψ – удельный расход реагента;

ξ – номер вещества H_2S .

Для емкости нейтрализации Е1: $i=1, k=7, n=16$ (см. рис. 1).

В основу расчета фазовых равновесий и теплофизических свойств материальных потоков положено кубическое уравнение состояния Пенга – Робинсона [11–12]. Согласно этому уравнению зависимости фугитивностей и энтальпий от температуры определяются выражениями [10]:

$$\ln f_j(T, P) = \frac{B_j}{B} (Z-1) - \ln(Z-B) + \frac{A}{4,828B} \left[\frac{B_j}{B} - \frac{2 \sum_{k=1}^N x_j (a\alpha_{jk})^{0,5}}{a\alpha} \right] \ln \frac{Z+2,414B}{Z-0,414B}, \quad (33)$$

$$H(T, P) = H_{uo}(T) + RT \left[1 - Z + \frac{A}{2,828B} \left(1 + \frac{D}{a\alpha} \right) \ln \frac{Z+2,414B}{Z-0,414B} \right]. \quad (34)$$

В уравнениях (33)–(34) параметры a, α, A, B, D определяются через температуры, давления и критические свойства веществ по известным формулам [11]. Сжимаемость фаз Z рассчитывается путем решения кубического уравнения [11]

$$Z^3 - (1-B)Z^2 + (A-2B-3B^2)Z - (AB-B^2-B^3) = 0. \quad (35)$$

Зависимость энтальпии идеального газа $H_{uo}(T)$ от температуры представляет собой аппроксимацию экспериментальных данных для химических веществ [13].

В силу сложности моделируемого процесса и многокомпонентности фаз аналитическое решение уравнений (6)–(35) является крайне затруднительной задачей. Для численного решения используется специализированный программный продукт «МиР ПиА Процесс» [14]. Он позволяет проводить численное моделирование технологических процессов и аппаратов в различных отраслях промышленности [15–16]. Модель УПН, реализованная с помощью программного продукта «МиР ПиА Процесс», представлена на рис. 7.

Для корректного прогнозирования показателей качества готовой продукции параметры математической модели необходимо идентифицировать в режиме реального времени согласно текущему режиму работы технологического оборудования.

Для идентификации моделей каждого из сепараторов С1, С2, С3 (модули МИС1 – МИС3 на рис. 3) используются измеренные данные о температуре T_3, T_5, T_8 , давлении P_2, P_4, P_{14} и расходе газа на выходе G_2, G_4, G_{14} . При этом значения температур T_3, T_5, T_8 и давлений P_2, P_4, P_{14} напрямую вносятся в математическую

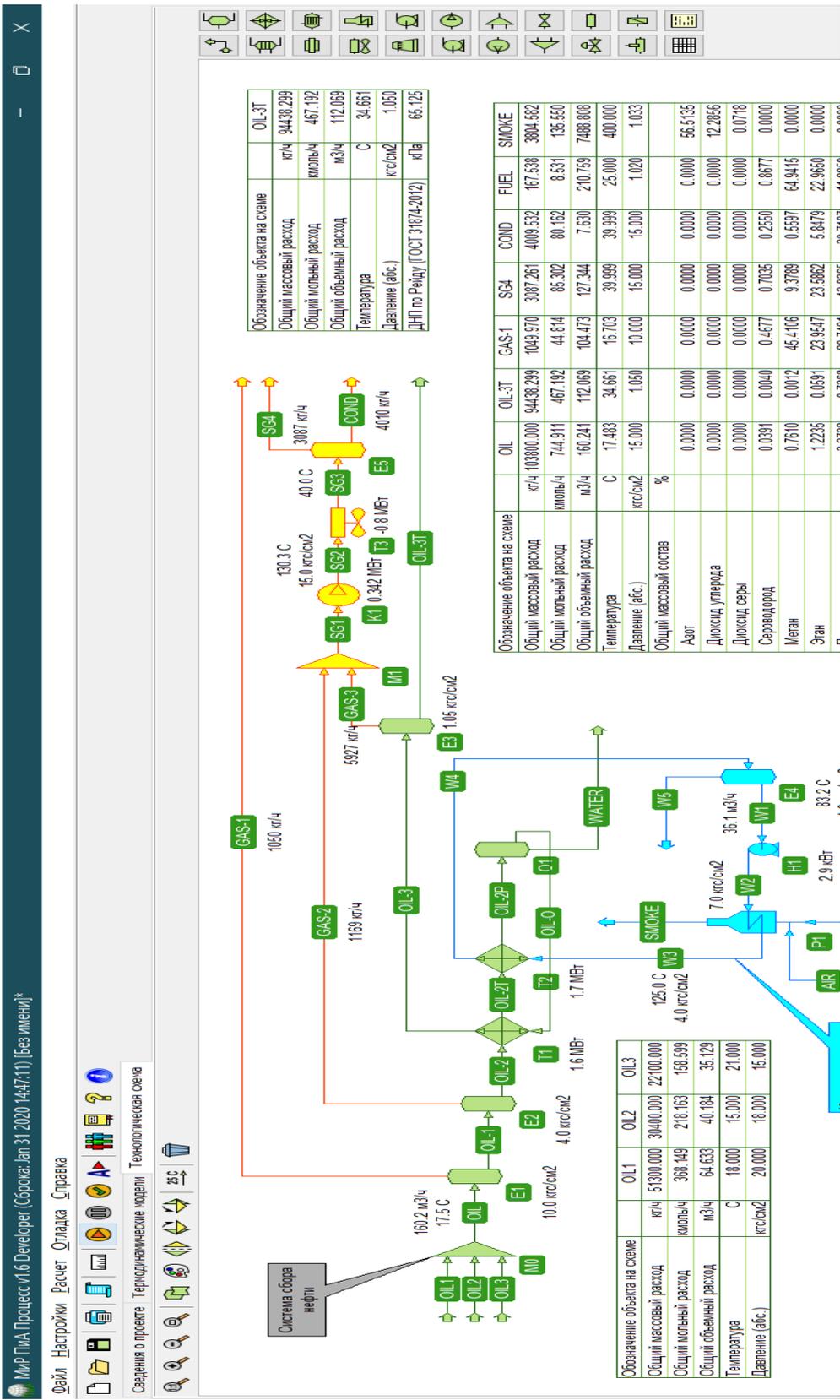


Рис. 7. Модель УПН, реализованная с помощью программного продукта «Мир ПИА Процесс».

модель (6)–(35). Затем определяется значение испарительного КПД ступени сепарации η_i , при котором расчетный расход газа $G_m^{расч}$ равен реальному G_m . Это равенство обеспечивается за счет уменьшения констант фазового равновесия ϕ_j на величину испарительного КПД:

$$\phi_j = \gamma_j \eta_i \frac{f_j^{жс}}{f_j^c}. \quad (35)$$

Типовая зависимость расчетного расхода газа от величины КПД приведена на рис. 8а. Монотонный характер этой зависимости позволяет найти единственное решение задачи идентификации модели сепаратора.

Схожим образом проводится идентификация модели теплообменников (модули МИТ1 – МИТ2, рис. 3). При этом для каждого из них используются измеренные значения температур выходных потоков. Здесь варьируемой величиной выступает коэффициент термических сопротивлений загрязнений r , влияющий на общий коэффициент теплопередачи аппарата. Величина коэффициента r находится из условия равенства расчетной выходной температуры потока реальному значению.

Типовая зависимость выходной температуры от коэффициента r также носит монотонный характер (рис. 8б), что позволяет найти единственное решение задачи.

Результатом решения уравнений (6)–(35) является определение значений показателей качества товарных потоков. Эти данные поступают в блок выбора режима для сравнения с нормативными значениями (см. рис. 3). В случае отклонения найденных значений от нормативных режимный модуль ИММ определяет температуру теплоносителя на выходе из печи $T_{печь}^{рек}$ и расход реагента для нейтрализации сероводорода $G_{реаг}^{рек}$. Эта задача имеет единственное решение и не требует применения многомерных методов поиска. Это возможно, так как $P_{ин}^{расч}$ зависит только от $T_{печь}^{рек}$, а $G_{реаг}^{рек}$ рассчитывается исходя из остаточного содержания сероводорода при температуре $T_{печь}^{рек}$.

Поэтому в первую очередь определяется температура $T_{печь}$ теплоносителя на выходе из печи, обеспечивающая требуемое значение давление насыщенных паров $P_{ин}^{норм}$. Решение этой обратной задачи осуществляется в режимном модуле ИММ методом многократного решения прямой задачи.

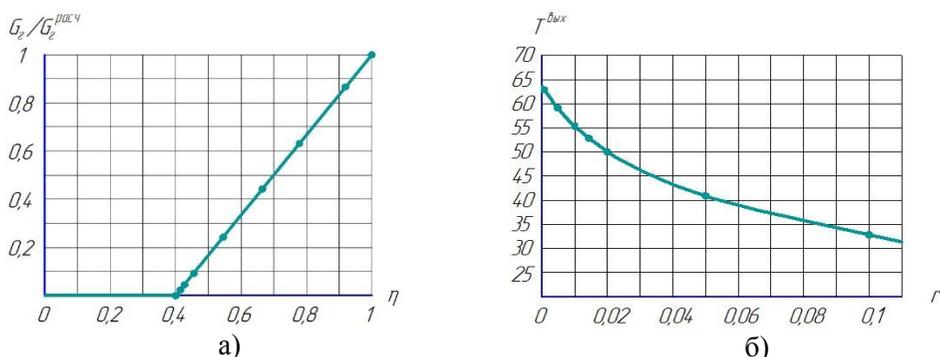


Рис. 8. Типовые зависимости, получаемые и используемые в ходе идентификации моделей сепаратора (а) и теплообменника (б)

На рис. 9 показан типовой график зависимости давления насыщенных паров от температуры теплоносителя. Монотонный характер представленной зависимости позволяет легко определить решение $T_{печь}$, например методом половинного деления.

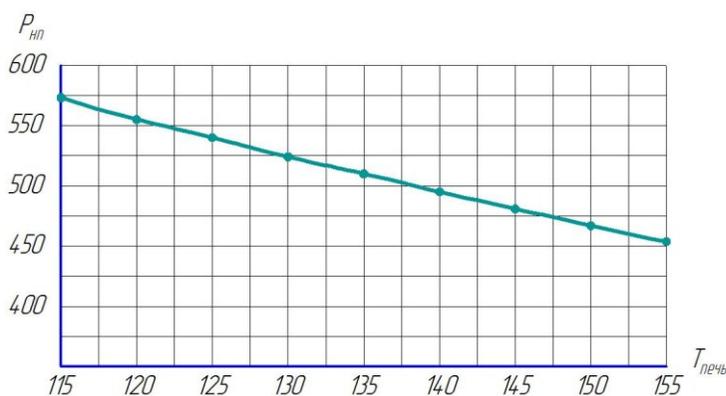


Рис. 9. Зависимость давления насыщенных паров от температуры теплоносителя

После определения температуры теплоносителя $T_{печь}^{рек}$ рассчитывается количество реагента, необходимого для нейтрализации сероводорода $G_{реаг}^{рек}$, по формуле (31).

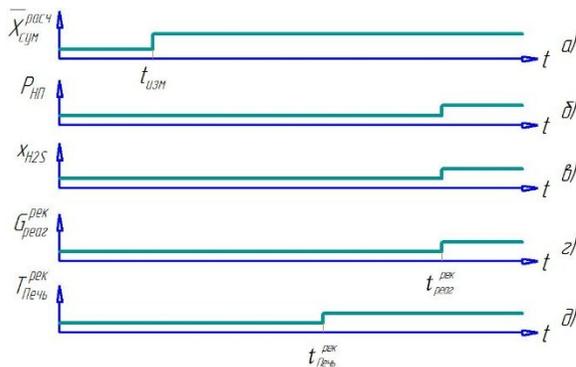


Рис. 10. Временные диаграммы изменения потоков УПН и транспортных задержек управляющих воздействий

Представленная выше математическая модель (6)–(35) описывает стационарный режим работы УПН, а корректировки технологического режима должны вноситься в разных точках технологической схемы. Время их внесения рассчитывается с учетом временной задержки на транспортировку. Это время определяется на основе модели идеального вытеснения и индивидуально для каждой конкретной УПН. На рис. 10 показаны типовые временные диаграммы изменения потоков УПН и транспортных задержек управляющих воздействий. Эти временные диаграммы относятся к простейшему случаю скачкообразного изменения состава $\bar{x}_{сум}^{расч}$ исходной нефти (график а). При этом изменение давления насыщенных паров товарной нефти $P_{нп}$ и содержания сероводорода x_{H2S} в ней про-

исходит синхронно в конце цикла подготовки (графики б и в). График г отображает время внесения корректировки расхода реагента $t_{реак}^{рек}$. Изменение температуры нагрева нефти $T_{печь}$ осуществляется с учетом инерции контура нагрева (график д).

Если, как отмечалось ранее, инерционность подачи реагента в модели (6)–(35) не учитывается, то изменение расхода реагента происходит в момент поступления потока новой нефти в емкость Е1. Однако в силу определенной инерционности контура нагрева теплоносителя регулировка печи должна происходить заблаговременно. Тогда для определения времени упреждения применяется эмпирическая формула, описывающая изменение во времени температуры потока 9, выходящего из теплообменника Т2 (см. рис. 11), как аperiodического звена с запаздыванием

$$T_9(t) = T_9^{кон} - (T_9^{кон} - T_9^{нач}) \exp\left(-\frac{t - t_{печь}^{рек}}{\tau_{цирк}}\right), \quad (36)$$

где $T_9^{нач}$, $T_9^{кон}$ – начальное и конечное значения температуры, соответствующие старому и новому технологическому режиму;

$\tau_{цирк}$ – постоянная времени контура циркуляции теплоносителя, определяемая экспериментально для конкретной УПН.

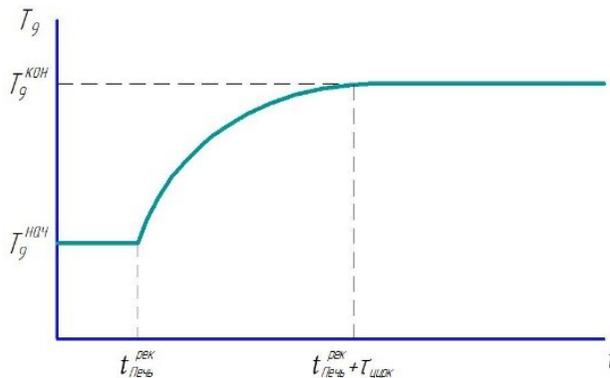


Рис. 11. График переходного процесса в теплообменнике Т2

Тогда время упреждения для печи будет равно (при допустимом отклонении температуры на 0,1 °С)

$$\tau_{печь} = \tau_{цирк} \ln \frac{T_9^{кон} - T_9^{нач}}{0,1}. \quad (37)$$

Как отмечалось выше, внедрение АСПК не отменяет необходимости периодического проведения лабораторных анализов. Их результаты используются для уточнения параметров γ_j математической модели (6)–(35). Необходимость проведения корректировки обусловлена тем, что в ходе эксплуатации меняются параметры технологического оборудования, что влияет на интенсивность испарения отдельных веществ [17]. В случае отклонения расчетного давления $P_{ин}^{расч}$ от действительного $P_{ин}$ проводится корректировка значения $\gamma_{C_1-C_4}$ для легких компонентов от метана (C₁) до бутана (C₄) включительно. В случае отклонения расчет-

ного содержания сероводорода $x_{H_2S}^{расч}$ от действительного x_{H_2S} проводится корректировка значения γ_{H_2S} для сероводорода. Решение этих обратных задач проводится аналогично решению обратной задачи по определению температуры теплоносителя на выходе из печи.

Наибольшую практическую пользу внедрение предложенной АСПК может принести для УПН, получающих сырую нефть с небольшого числа скважин. Эти установки являются наиболее чувствительными, так как изменение объемов добычи или остановка на ремонт даже одной скважины может оказать существенное влияние на состав исходной нефти. Однако и для больших УПН внедрение АСПК является актуальным, так как позволит избежать получения некондиционной нефти при авариях в системе сбора нефти, а также при резкой смене параметров окружающей среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гумовский О.А.* Способ поддержания качества товарной нефти на УПН в условиях изменяющихся свойств сырья // Сб. научных трудов ТатНИПИнефть. – Казань, 2013. – № 81. – С. 420–427.
2. *Веревкин А.П.* Оперативное управление технологическими процессами подготовки нефти по технико-экономическим показателям / А.П. Веревкин, И.Д. Ельцов, Ю.И. Зозуля, О.В. Киришин // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – М.: ВНИИОЭНГ, 2006. – № 3. – С. 48–53.
3. *Артюшкин И.В.* Нейросетевая система управления процессом термохимического обезвоживания нефтяных эмульсий: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Артюшкин Илья Вячеславович. – Самара, 2018. – 136 с.
4. *Кузичкин А.А.* Адаптивная система управления технологическим процессом риформинга с идентифицируемой моделью: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Кузичкин Алексей Анатольевич. – Самара, 2018. – 137 с.
5. *Путохин В.С.* Статистическая модель управления процессом подготовки нефти // РНТС ВНИИОЭНГ. Сер. «Автоматизация и телемеханизация нефтяной промышленности». – 1979. – № 9. – С. 9–12.
6. *Коноваленко Д.В.* Система поддержки принятия решений при подготовке нефти с использованием цифрового двойника технологической установки // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. – № 1(28). – С. 23–24.
7. *Коноваленко Д.В., Коныгин С.Б.* Система поддержания качества подготовки нефти с использованием математической модели в системе управления // Сборник статей XXX международной научно-практической конференции «EurasiaScience». – Москва: «Научно-издательский центр «Актуальность. РФ», 2020. – с.60-62.
8. *Тронов В.П.* Промысловая подготовка нефти. – Казань: ФЭН, 2000. – 416 с.
9. *Коноваленко Д.В., Коныгин С.Б.* Модель смешения нефтей с учетом транспортной задержки // Сборник научных статей по итогам Шестой международной научной конференции «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности». – Казань, 2020. – С. 93–95.
10. *Иваняков С.В., Игнатенков Ю.И., Коноваленко Д.В.* Моделирование работы пластинчатых теплообменников в системе двухконтурного водоснабжения // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2017. – № 2(54). – С. 196–199.
11. *Уэйлес С.* Фазовые равновесия в химической технологии. – М.: Мир, 1989. – Т. 1. – 304 с.
12. *Гуревич Г.Р., Брусиловский А.И.* Справочное пособие по расчету фазового состояния и свойств газоконденсатных смесей. – М.: Недра, 1984. – 264 с.
13. *Коныгин С.Б., Коноваленко Д.В.* Система автоматизированного тестирования базы данных по теплофизическим свойствам веществ // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2018. – № 1(57). – С. 177–180.
14. *Коныгин С.Б., Крючков Д.А.* Моделирование и расчет процессов и аппаратов (МиР ПиА). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015613176.

15. *Коныгин С.Б., Коноваленко Д.В.* Использование программного комплекса «МиР ПиА» для моделирования работы установки стабилизации нефти // Сборник трудов конференции «Ашировские чтения», Туапсе, 2019. – Т. 1. – № 1 (11). – С. 348–349.
16. *Коныгин С.Б., Коноваленко Д.В.* Использование программного комплекса «МиР ПиА» для моделирования работы установки низкотемпературной конденсации // Сборник трудов конференции «Ашировские чтения», Туапсе, 2019. – Т. 1. – №1 (11). – С. 360–362.
17. *Лесухин С.П.* Интенсификация тепломассообменных процессов в технологии промышленной подготовки нефти на основе принципа газожидкостного взаимодействия на вертикальных контактных решетках: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.17.08 / Лесухин Сергей Петрович. – Самара, 2000. – 372 с.

Статья поступила в редакцию 1 октября 2020 г.

ADAPTIVE SYSTEM FOR MAINTAINING THE QUALITY OF THE FIELD OIL TREATMENT

S.B. Konygin, D.V. Konovalenko, D.A. Kryuchkov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *The paper deals with the issues of creating an adaptive system for maintaining the quality of field oil treatment. The proposed system is based on a mathematical model of the oil preparation process, which allows predicting the quality indicators of commercial products. To prevent the deviation of the commercial oil quality indicators from the standard values, the system predicts new values of the technological regime parameters and the time of their correction. The mathematical model of the process is implemented in a software product for modeling and calculating processes and devices "MiR PiA Process". The proposed system constantly adapts the mathematical model to the real operating mode of the installation on the basis of instrumentation and automation data, as well as periodically obtained results of laboratory analyzes.*

Keywords: *field oil treatment, automated control system, modeling of oil treatment process.*

REFERENCES

1. *Gumovsky O.A.* Method of maintaining the quality of marketable oil at the oil treatment plant under conditions of changing properties of raw materials. Scientific works of TatNIPIneft. – Kazan, 2013. – No. 81. – P. 420–427.
2. *Verevkin A.P.* Operational control of technological processes of oil preparation according to technical and economic indicators / A.P. Verevkin, I.D. Yeltsov, Yu.I. Zozulya, O.V. Kiryushin // Automation, telemechanization and communication in the oil industry. Moscow: VNIIOENG, 2006. No. 3. P. 48–53.
3. *Artyushkin I.V.* Neural network control system for the process of thermochemical dehydration of oil emulsions: dissertation of the candidate of technical sciences: 05.13.06 / Artyushkin Ilya Vyacheslavovich. – Samara, 2018. – 136 p.

Sergey B. Konygin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

Denis V. Konovalenko, Senior Lecture.

Dmitry A. Kryuchkov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

4. *Kuzichkin A.A.* An adaptive reforming process control system with an identifiable model: dissertation of the candidate of technical sciences: 05.13.06 / Kuzichkin Alexey Anatolyevich, Samara 2018. – 137 p.
5. *Putokhin V.S.* Statistical model of oil treatment process control. – RNTS VNIIOENG. Ser. "Automation and telemechanization of the oil industry", 1979, No. 9, p. 9–12.
6. *Konovalenko D.V.* Decision support system for oil treatment using the digital twin of the technological unit // Modeling, optimization and information technologies. 2020. – № 1 (28). – P. 23–24.
7. *Konovalenko D.V., Konygin S.B.* The system for maintaining the quality of oil for oil preparation using a mathematical model in the control system // Collection of articles of the XXX international scientific and practical conference "EurasiaScience". – Moscow: "Research and Publishing Center" Actuality.RF, 2020. – Pp. 60–62.
8. *Tronov V.P.* Field treatment of oil. – Kazan: FEN, 2000. – 416 p.
9. *Konovalenko D.V., Konygin S.B.* Model of oil mixing taking into account transport delay // Collection of scientific articles on the results of the sixth international scientific conference "Priority areas of innovative activity in industry". – Kazan, 2020. – Pp. 93–95.
10. *Ivanyakov S.V., Ignatenkov Yu.I., Konovalenko D.V.* Modeling the operation of plate heat exchangers in a double-circuit water supply system // Bulletin of the Samara State Technical University. Technical Science Series, 2017. – No. 2 (54). – Pp. 196–199.
11. *Wayles S.* Phase equilibria in chemical technology. – M.: Mir, 1989. – Vol. 1. – 304 p.
12. *Gurevich G.R., Brusilovsky A.I.* A reference manual for calculating the phase state and properties of gas-condensate mixtures. – M.: Nedra, 1984. – 264 p.
13. *Konygin S.B., Konovalenko D.V.* The system of automated testing of the database on the thermophysical properties of substances // Bulletin of the Samara State Technical University. Technical Science Series, 2018. – No. 1 (57). – p. 177–180.
14. *Konygin S.B., Kryuchkov D.A.* Modeling and calculation of processes and devices (MiR PiA). Certificate of state registration of the computer program No. 2015613176.
15. *Konygin S.B., Konovalenko D.V.* The use of the "MiR PiA" software package for modeling the operation of the oil stabilization unit // Proceedings of the conference "Ashirovskie readings", Tuapse, 2019. – V. 1. – No. 1 (11). – Pp. 348–349.
16. *Konygin S.B., Konovalenko D.V.* Using the software complex "MiR PiA" to simulate the operation of a low-temperature condensation unit // Proceedings of the conference "Ashirovskie readings", Tuapse, 2019. – V. 1. – No. 1 (11). – Pp. 360–362.
17. *Lesukhin S.P.* Intensification of heat and mass transfer processes in oil field treatment technology based on the principle of gas-liquid interaction on vertical contact grids: dissertation of Dr. Tech. Sciences: 05.17.08 / Lesukhin Sergey Petrovich. – Samara, 2000. – 372 p.

УДК 62-50

СИНТЕЗ РЕЛЕЙНОЙ СИСТЕМЫ С ПЕРЕМЕННЫМ ГИСТЕРЕЗИСОМ КАК АЛЬТЕРНАТИВА СКОЛЬЗЯЩЕМУ РЕЖИМУ УПРАВЛЕНИЯ

Д.А. Рагазин, Чостковский Б.К.

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. Предложены и исследованы алгоритмы управления релейными системами с отрицательным переменным гистерезисом в статической характеристике управляющего устройства и переменной структуре, которые обеспечивают упрощение регулирующего устройства за счет исключения переменной времени из закона управления. Проведено сравнение со скользящим режимом управления, использующим производную в законе управления. Описанные алгоритмы управления рассмотрены на примере системы вентиляции и отопления с трехпозиционным клапаном в качестве управляющего устройства. Цифровое моделирование разработанных алгоритмов подтверждает эффективность их использования применительно к широкому классу управляемых объектов по целому ряду качественных показателей функционирования релейных систем автоматического регулирования. Показано, что переходные характеристики систем автоматического управления при одинаковых начальных условиях имеют монотонный характер и одинаковое время переходного процесса. При этом управление с отрицательным переменным гистерезисом проще в реализации и последующей настройке.

Ключевые слова: релейная система управления, переменная структура, скользящий режим, квазискользкий режим, статическая ошибка, система вентиляции и отопления, отрицательный переменный гистерезис.

Системы с переменной структурой, введенные в теорию и практику автоматического регулирования С.В. Емельяновым [1], позволяют во многих случаях существенно повысить эффективность управления динамическими объектами. Идея их построения состоит в организации нескольких структур регулятора и смене их путем переключения в процессе управления объектом таким образом, чтобы в наибольшей степени использовать положительные свойства каждой из структур.

Практическая ценность релейных систем с переменной структурой определяется возможностью обеспечения в них адаптивности, инвариантности, линеаризации и понижения порядка за счет организации скользящих и квазискользких процессов в замкнутой системе [2, 3, 4].

Существенным преимуществом релейного управления является также значительное упрощение исполнительных управляющих устройств, обеспечивающих

Рагазин Дмитрий Александрович (к.т.н.), доцент кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

Чостковский Борис Константинович (д.т.н., проф.), профессор доцент кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

возможность получения заданных динамических свойств системы при малых весах и габаритах.

В последние годы развитие компьютерных технологий, разработка методов анализа и синтеза нелинейных систем позволили повысить качество результатов исследований, увеличить разнообразие исследуемых систем, привели к повышению интереса исследователей к переключающимся и гибридным системам, образованным подсистемами различных типов и уровней иерархии [5].

В практических задачах автоматизации часто приходится сталкиваться с релейными системами управления.

Рассмотрим структуру, представленную на рис. 1 функциональной схемой.

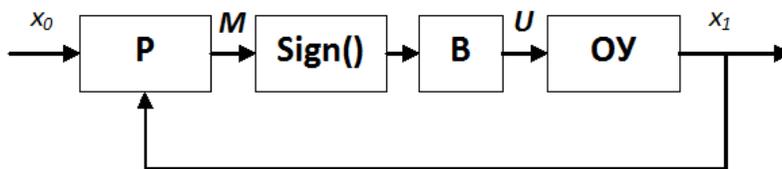


Рис. 1. Функциональная схема рассматриваемой системы автоматического регулирования

Здесь P – регулятор, OU – линейная часть объекта управления, B – величина управляющего воздействия («полка» реле), $sign()$ – знаковая функция, принимающая значения $+1$ или -1 . x_0 – задающее воздействие, x_1 – регулируемая координата, U – управляющее воздействие.

Подобную структуру имеют простейшие объекты управления, в качестве управляющего механизма в которых используется трехпозиционный клапан, имеющий на входе только два дискретных сигнала: открывать и закрывать.

В качестве примера можно рассмотреть систему вентиляции и отопления производственного помещения или лаборатории (рис. 2).

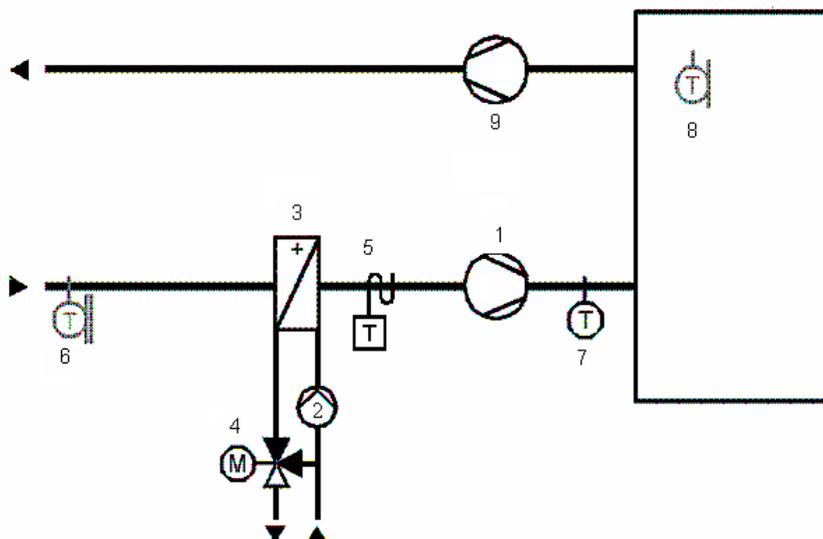


Рис. 2. Система вентиляции и отопления:

1 – приточный вентилятор; 2 – насос; 3 – водяной калорифер; 4 – трехпозиционный клапан;

5 – термостат угрозы заморозки; 6 – датчик температуры наружного воздуха; 7 – датчик температуры приточного воздуха; 8 – датчик температуры воздуха в помещении; 9 – вытяжной вентилятор

Выходным воздействием в указанной системе служит температура воздуха в обслуживаемом помещении. Особенностью подобных систем является непредсказуемый ступенчатый характер возмущающего воздействия (включение дополнительных обогревателей, теплотери при открытии ворот и т. д.), а также требования к монотонности переходного процесса без перерегулирования.

Внешними возмущающими воздействиями для обслуживаемого помещения являются тепловая, влажностная и аэродинамическая нагрузки. Внутренними возмущающими воздействиями являются тепловая, влажностная и аэродинамическая нагрузки самого помещения. Входными воздействиями для описываемой системы являются температура, влажность и расход поступающего воздуха [6]. Выходными воздействиями являются температура, влажность и аэродинамическая нагрузка воздуха в обслуживаемом помещении. В системах комфортного кондиционирования для стабилизации заданного состояния в общем случае можно использовать все три управляющих воздействия. Возможность применения каждого из них определяется как исходными данными и наложенными ограничениями, так и соображениями экономии. Т. к. в описываемых системах влажностная и газовая нагрузка постоянны, обычно подобные системы рассматриваются как системы стабилизации температуры. Из-за высоких капитальных затрат и сложностей управления системы стабилизации температуры за счет изменения расхода приточного воздуха используются редко. Наиболее распространенными являются системы стабилизации температуры в помещении по каналу изменения температуры приточного воздуха. Такие системы наиболее полно исследованы как объекты автоматизации [6].

Обслуживаемое помещение характеризуется рассредоточенными показателями воздуха. Учет рассредоточенных характеристик затруднен, поэтому помещение при решении задач автоматического регулирования рассматривается как объект с сосредоточенными параметрами, т. е. температура и влажность воздуха определяются в наиболее типичной (рабочей) зоне [6].

Кроме того, в подобных системах пренебрегают постоянными времени исполнительных механизмов и запаздываниями, т. к. они пренебрежимо малы по сравнению с постоянной времени помещения. Учитывая, что для помещений характерны периоды изменения составляющих тепловой нагрузки от нескольких минут до часов, в задачах с такими периодами колебаний можно пренебречь инерционностью ограждений и представить помещение апериодическим звеном первого порядка [6].

Целью данной работы является разработка и исследование релейных с переменным гистерезисом и дискретно-непрерывных законов и алгоритмов управления динамическими объектами при ограниченном доступе к измерительной информации о состоянии системы.

При формировании закона управления подобным объектом управления удобно использовать скользящий режим. Применение скользящих режимов в системах автоматического управления, предложенных В.И. Уткиным [2], получило большое развитие в теории и практике автоматического управления [7, 8, 9, 10], в том числе в системах кондиционирования [11]. Широкое распространение применения скользящего режима управления обусловлено его простотой, надежностью и инвариантностью к возмущающим воздействиям, а также возможностью получения монотонного характера переходных процессов [12].

Однако использование скользящего режима имеет ряд недостатков: переключение релейного элемента с бесконечной частотой в процессе управления, дифференцирование управляемой величины. Использование дополнительных алгоритмов для подавления высокочастотных колебаний в процессе управления усложняет систему и может влиять на качество регулирования. Кроме того, для реализации алгоритма управления рассматриваемыми простыми объектами управления обычно используются устройства, которые обладают меньшей вычислительной мощностью и функционалом, с целью уменьшения стоимости системы автоматического регулирования. В подобных устройствах отсутствуют часы реального времени, необходимые для реализации функции дифференцирования. Кроме того, время выполнения цикла программы также непостоянно либо вовсе неизвестно. Соответственно, данные устройства не позволяют использовать функции времени в законах управления и на них оказывается невозможным реализовать скользящий режим или ПИД-регулирование.

Поэтому управление, реализующее системы с переменным гистерезисом, основанные на использовании в обратной связи только регулируемой координаты и ее экстремальных значений [3, 13, 14], особенно актуально из-за более простой технической и алгоритмической реализации по сравнению с алгоритмами, использующими производную выходного воздействия в законе управления.

В настоящей статье рассматриваются релейные системы автоматического управления с законом управления:

$$U(t) = B \cdot \text{sign}(M(t)). \quad (1)$$

Переключения управления происходят всякий раз, когда функция переключения $M(t)$ обращается в ноль.

Рассмотрим две различные функции переключения:

В первом случае рассмотрим управление, использующее скользящий режим. Функция переключения имеет вид [12]

$$M_1(t) = x_0 - T_2 x_2(t) - x_1(t), \quad (2)$$

где

$$x_2 = \frac{dx_1}{dt},$$

x_0 – заданное конечное состояние (задающее воздействие).

Во втором случае рассмотрим релейную систему с переменной структурой и переменным гистерезисом релейной характеристики управляющего устройства [3], функция переключения которого может быть представлена в виде

$$M_2(t) = x_0 + k \cdot (x_e(t) - x_0) - x_1(t), \quad (3)$$

где k – постоянный коэффициент, $-1 < k < 1$;

x_0 – заданное конечное состояние;

$x_e(t)$ – экстремальные значения регулируемой координаты $x(t)$ (ее максимум $x_{\max}(t)$ или минимум $x_{\min}(t)$), ближайšie к рассматриваемому моменту времени t экстремальные значения $x_i(t)$ (локальные максимумы $x_{\max}(t)$ и минимумы $x_{\min}(t)$), достигаемые в момент $\tau < t$ на предшествующей стадии про-

цесса управления и фиксируемые по принципу запоминания экстремума в системах экстремального регулирования:

$$x_{\max}(t) = x_1(\tau), t > \tau, \text{ если } x_1(t + \Delta t) - x_1(t) < 0 \text{ и } x_1(\tau - \Delta t) - x_1(\tau) < 0$$

$$x_{\min}(t) = x_1(\tau), t > \tau, \text{ если } x_1(t + \Delta t) - x_1(t) > 0 \text{ и } x_1(\tau - \Delta t) - x_1(\tau) > 0, \quad (4)$$

где $\Delta t > 0$.

Согласно (3) и (4) получаем гистерезисную характеристику $U(x)$ алгоритма управления (1):

$$U(x) = \begin{cases} B \text{ при } x < a \vee a \leq x \leq b, \text{ если } x_e(t) = x_{\max}(t); \\ -B \text{ при } x > b \vee a \leq x \leq b, \text{ если } x_e(t) = x_{\min}(t), \end{cases} \quad (5)$$

где $a = x_0 + k(x_{\min}(t) - x_0)$, $b = x_0 + k(x_{\max}(t) - x_0)$.

Если коэффициент k установлен в диапазоне $0 < k < 1$, переключения управления (1) происходят с опережением по отношению к величине x_0 (причем это опережение поставлено в линейную зависимость от амплитуды автоколебаний $A = |x_e(t) - x_0|$), а при $-1 < k < 0$ – с запаздыванием. При $k = 0$ уравнение (3) описывает нелинейность типа «идеальное реле».

В соответствии с (3)–(4) ширина зоны гистерезиса и ее границы скачкообразно изменяются в процессе управления при появлении новых точек локальных экстремумов кривой $x_1(t)$ переходного процесса.

Регулятор (1) с функцией переключения (3) при изменении коэффициента k в диапазоне $0 < k < 1$ обеспечивает переключение управления с опережением по отношению к задающему воздействию x_0 , что равносильно введению производной в закон управления.

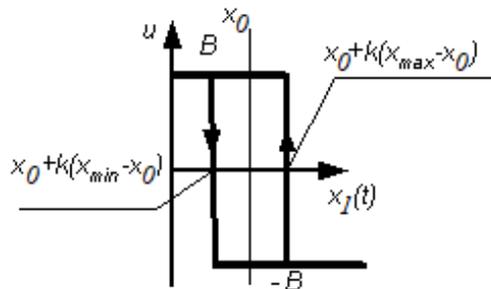


Рис. 3. Статическая характеристика релейного регулятора с переменным гистерезисом

На рис. 6–7 представлены результаты моделирования (фазовая траектория ошибки и переходная характеристика) управления объектом, представленном на рис. 1. Рассматриваемый объект управления линейный и описывается дифференциальным уравнением второго порядка:

$$T_0 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + \frac{dx_1}{dt} = k_0 u, \quad x_2 = \frac{dx_1}{dt} \quad (6)$$

с параметрами $T_0 = 4\text{с}$; $k_0 = 1$.

Будем использовать и сравнивать управляющие воздействия (2) и (3) при различных коэффициентах указанных функций управления. Для этого построим

Simulink-модель, представленную на рис. 4 и 5.

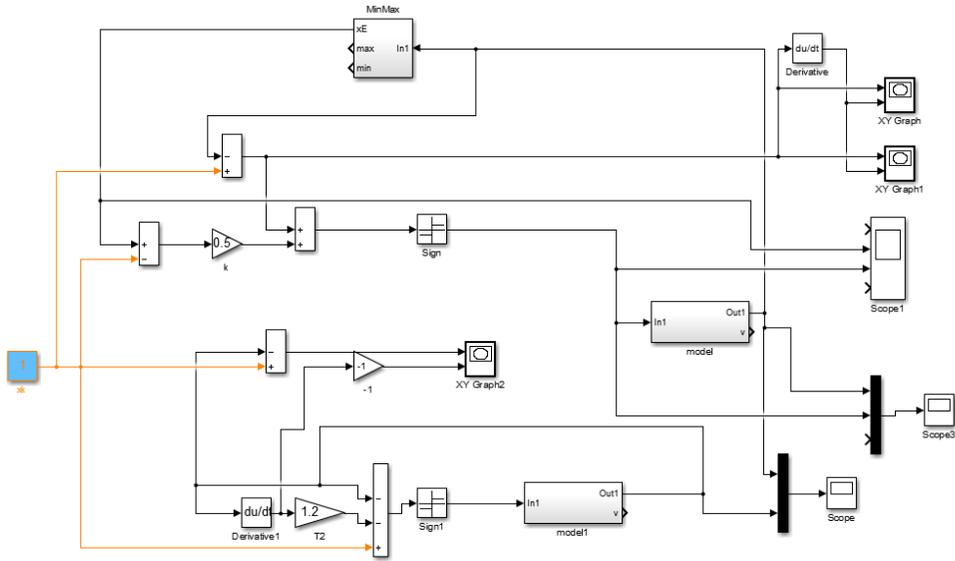


Рис. 4. Модель системы в Simulink

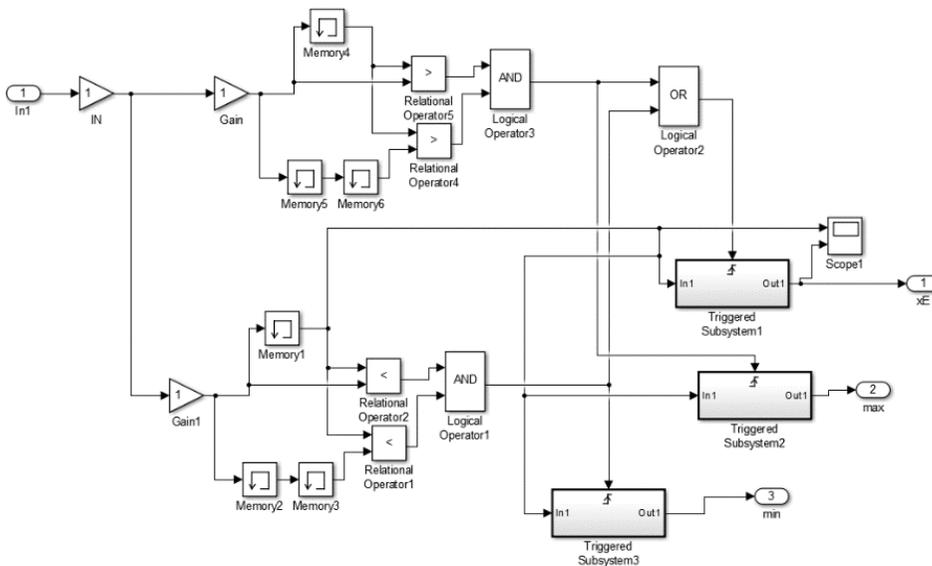


Рис. 5. Модель блока определения экстремумов

В данной модели реализовано два одинаковых объекта управления (5) с различными законами управления (2) и (3). Чтобы сравнить два алгоритма управления, помимо одинаковых начальных условий будем настраивать управляющие устройства таким образом, чтобы первое переключение релейного элемента происходило одновременно.

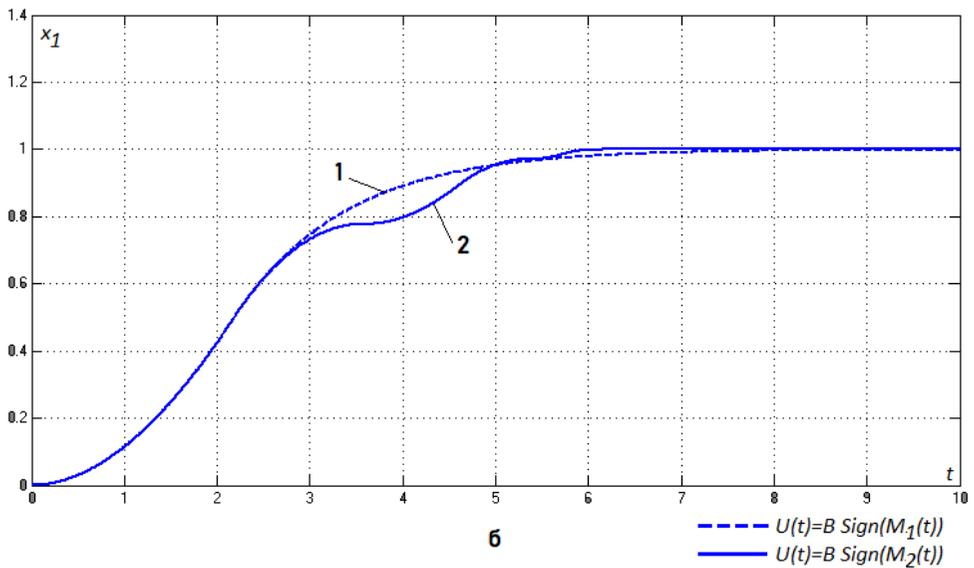
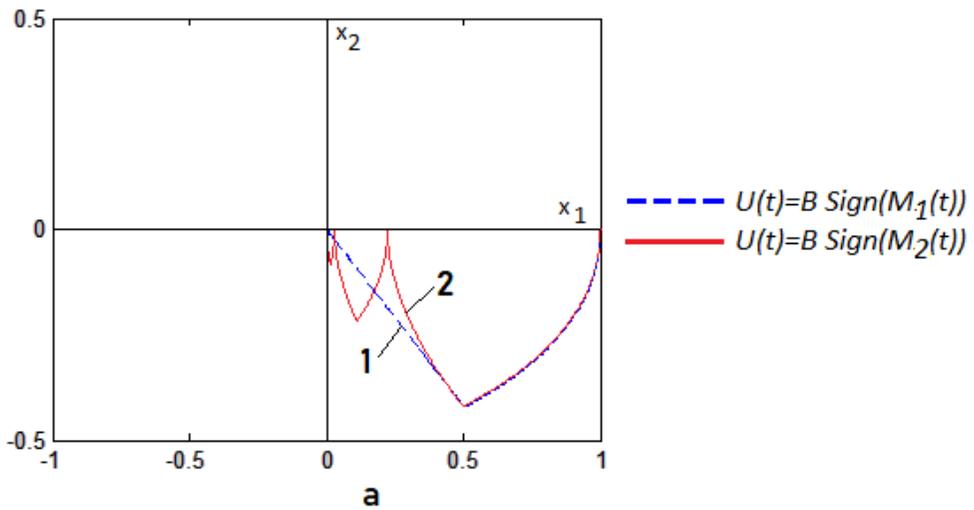
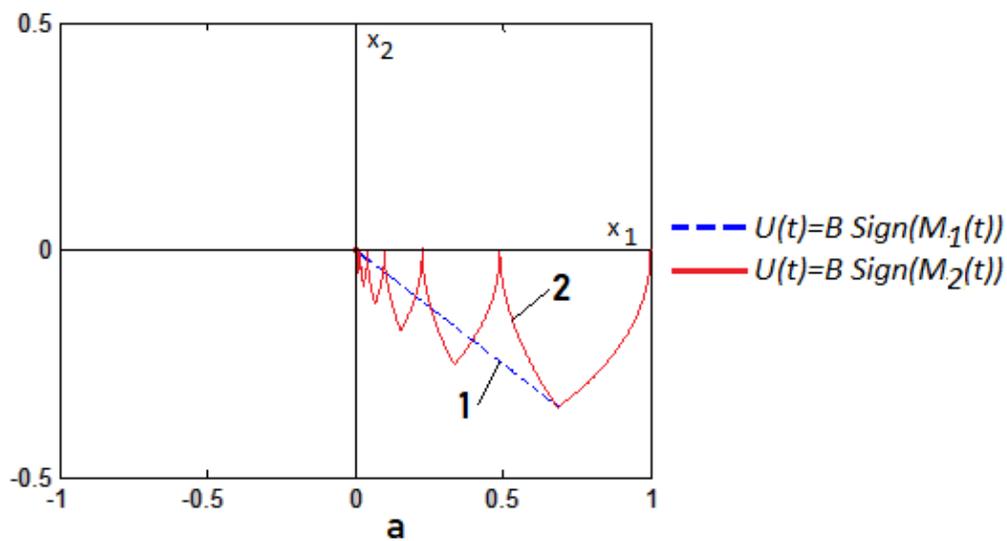
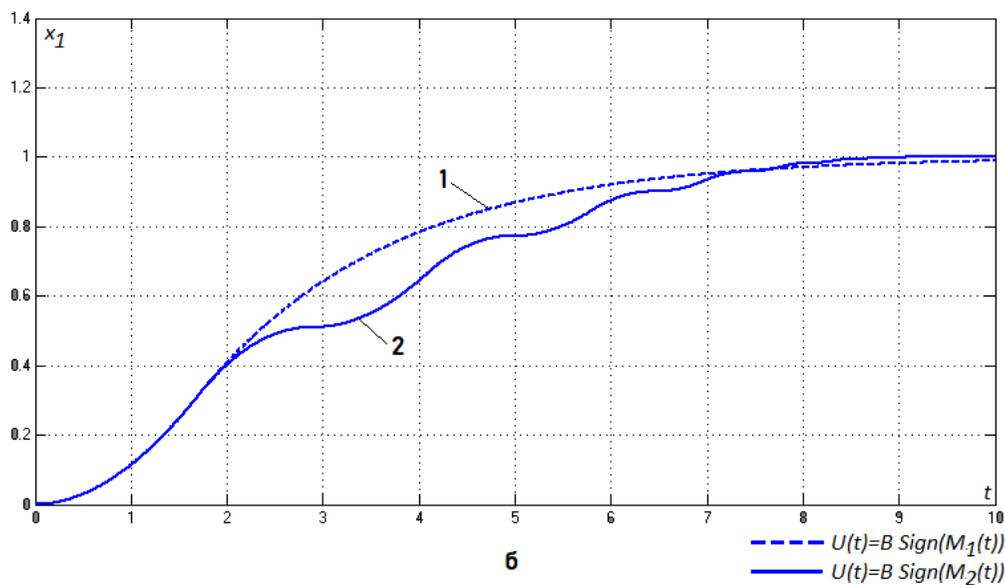


Рис. 6. Результаты моделирования при $T_2=1,2$; $k=0,5$:
 а – фазовые траектории; б – переходный процесс;
 1 – $U(t) = B \cdot \text{sign}(M_1(t))$, 2 – $U(t) = B \cdot \text{sign}(M_2(t))$



a



б

Рис. 7. Результаты моделирования при $T_2=2$; $k=0,685$:
 а – фазовые траектории; б – переходный процесс;
 1 – $U(t)=B \cdot \text{sign}(M_1(t))$; 2 – $U(t)=B \cdot \text{sign}(M_2(t))$

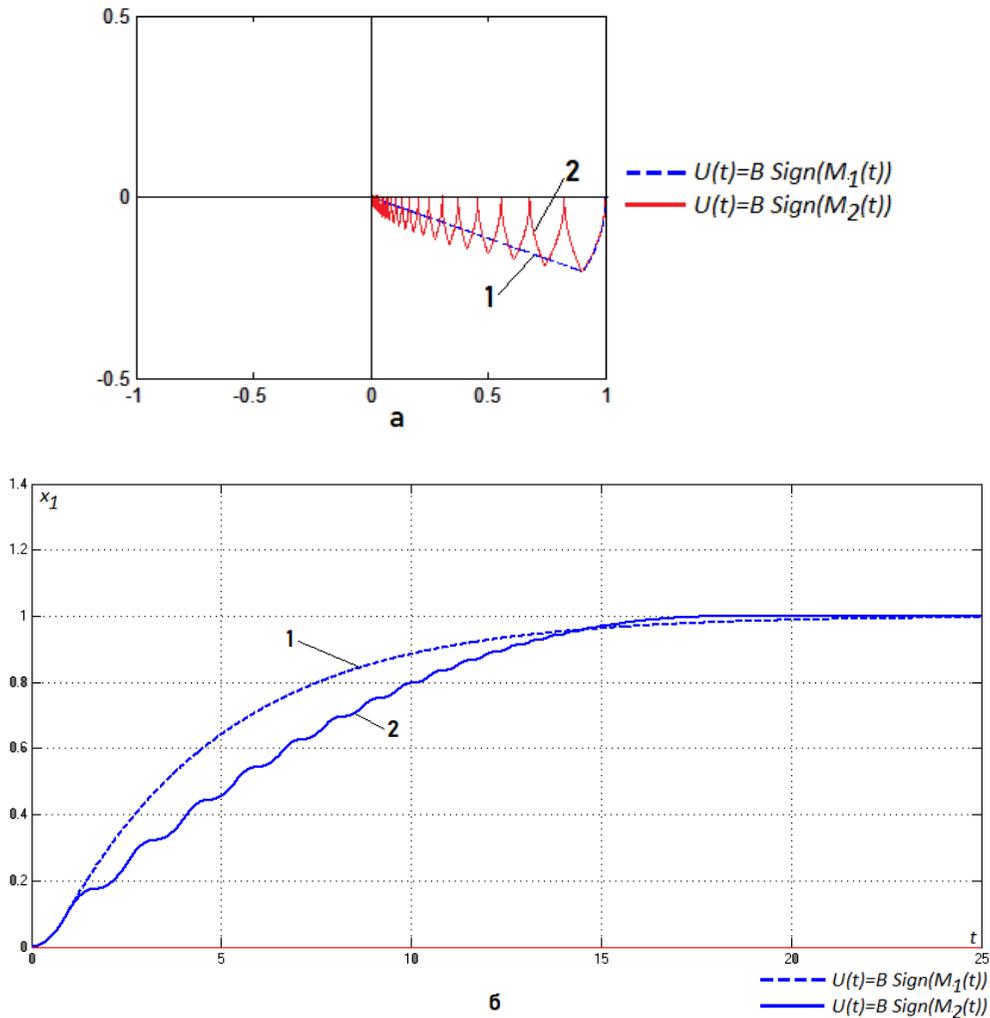


Рис. 8. Результаты моделирования при $T_2=4,4$; $k=0,9$:
 a – фазовые траектории; b – переходный процесс;
 $1 - U(t) = B \cdot \text{sign}(M_1(t))$; $2 - U(t) = B \cdot \text{sign}(M_2(t))$

Из полученных результатов моделирования видно, что переходный процесс в случае использования управления (3) близок к монотонному. Длительность переходного процесса в случае квазискользящего режима практически не отличается от такового в скользящем режиме (не более 3%). При этом отсутствует необходимость дифференцирования выходной координаты, как и любых других вычислений, связанных с реальным временем, что существенно упрощает (а следовательно, и удешевляет) управляющее устройство. Кроме того, в отличие от скользящего режима, в процессе управления отсутствуют переключения релейного элемента с бесконечной частотой и связанная с этим необходимость использования дополнительных алгоритмов, предохраняющих от поломок реальные управляющие устройства. На рис. 9 представлены результаты моделирования управляющего воздействия $U(t)$ для модели, переходные процессы которой представлены на рис. 8.

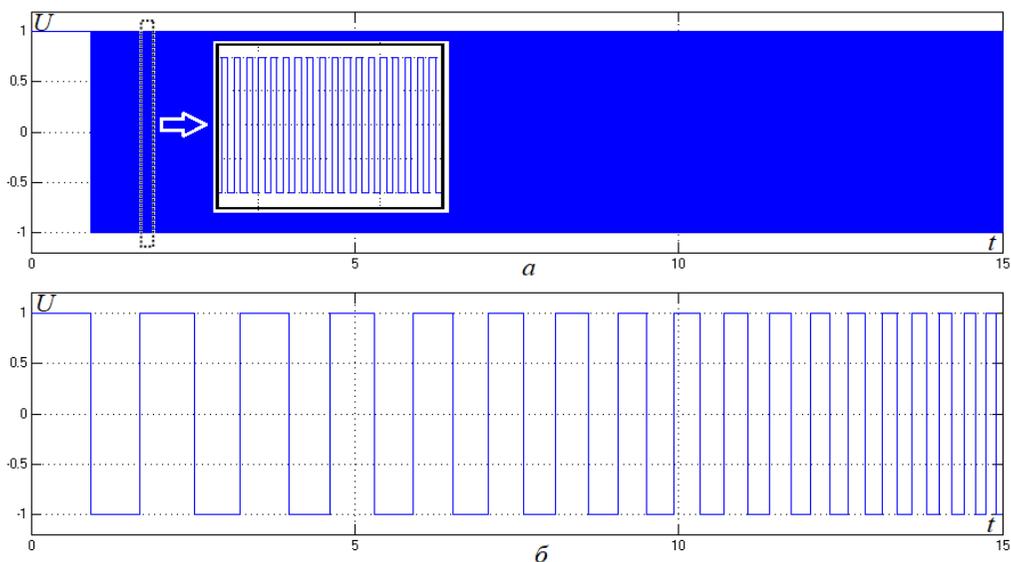


Рис. 9. Переключение релейного элемента:
 $a - U(t) = B \cdot \text{sign}(M_1(t))$; $b - U(t) = B \cdot \text{sign}(M_2(t))$

На рис. 9а видны переключения релейного элемента в скользящем режиме при управлении (2). Высокочастотные переключения релейного элемента начинаются после первого же переключения, и график переходного процесса сливается в сплошную полосу. На рис. 9б видно, что при использовании в законе управления функции переключения (3) постоянные высокочастотные переключения релейного элемента отсутствуют, поэтому дополнительных алгоритмов для предотвращения этих колебаний вводить не требуется. При этом следует помнить, что в установившемся режиме высокочастотные колебания присутствуют как при управлении (2), так и при управлении (3). Однако эти колебания легко устраняются введением простой зоны нечувствительности.

Таким образом, использование квазискользящего режима позволяет добиться сходных характеристик переходного процесса. При этом алгоритм легко реализуем в ПЛК и более простых управляющих устройствах, в которых невозможно реализовать регулирование, использующее в своем алгоритме время (ПИД-регулирование или скользящий режим). Кроме того, использование управления (3) позволяет получить переходный процесс, близкий к монотонному при любых начальных условиях. Также преимуществом управления (3) является простота его настройки, позволяющая получить желаемый переходный процесс без определения параметров объекта управления.

Полученные результаты могут быть использованы при синтезе терминальных систем позиционирования динамических объектов с целью достижения заданного быстродействия [15].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Емельянов С.В. Системы автоматического управления с переменной структурой. – М.: Наука, 1970. – 598 с.
2. Уткин В.И. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления. – М.: Наука, 1981. – 368 с.

3. Рагазин Д.А., Вохрышев В.Е. Квазискользящие процессы в релейных системах с отрицательным переменным гистерезисом // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2008. – № 1(21). – С. 5–9.
4. Методы современной теории автоматического управления. – Т. 5 / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Изд. МГТУ им. И.Э. Баумана, 2004. – 784 с.
5. Феофилов С.В. Анализ автоколебаний в системах с трехпозиционным релейным элементом и цифровым управлением // Вестник ТулГУ. Сер. Системы управления. Вып. 1. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2008. – С. 161–165.
6. Бондарь Е.С. и др. Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования воздуха: Учеб. пособие. – К.: Аванпост-Прим, 2005. – 560 с.
7. Кочетков С.А., Уткин В.А. Инвариантность в системах с неидеальными релейными элементами // УБС. – № 27 (2009). – С. 117–168.
8. Симоньянц Р.П., Аверьянов П.В. Синтез релейного управления ориентацией и стабилизации космического аппарата, обеспечивающий высокое качество без применения датчиков скорости // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, разд. «Авиационная и ракетно-космическая техника». – 2018. – № 3(120). – С. 104–119.
9. Utkin V., Jurgen G., Jingxin S. Sliding mode Control in Electro-Mechanical Systems. Second edition. Boca Ration, London, New York: Taylor & Francis Group. 2009. 504 p.
10. Shtessel Y., Edwards C., Fridman L., Levant A. Sliding mode Control and Observation. New York, Heidelberg, Dordrecht: Springer. 2010. 369 p.
11. Utkin V.I., Chang H.-C., Keyhani A. Sliding mode control for automobile air conditioner, IFAC 2002. Barcelona, Spain.
12. Рагазин Д.А., Вохрышев В.Е. Скользящие режимы в системах управления // Актуальные проблемы педагогики и психологии высшей школы: сб. науч. статей. – Самара: Изд-во СГАКИ, 2008 (Сер. «Академические тетради». Вып. 6). – С. 179–187.
13. Вохрышев В.Е. Самонастраивающиеся алгоритмы устранения статических ошибок в автоматических линейных и автоколебательных нелинейных системах стабилизации динамических объектов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2012. – № 4(36). – С. 19–24.
14. Бакланов А.С., Вохрышев В.Е. Релейные системы с переменной структурой и пассивной адаптацией // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2015. – № 2 (46). – С. 7–12. ISSN 1991-8542.
15. Чостковский Б.К., Колтациков С.А. Синтез цифрового регулятора терминальной системы позиционирования динамического объекта // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. С.П. Королева. – 2010. – № 2. – С. 238–240.

Статья поступила в редакцию 29 сентября 2020 г.

RELAY SYSTEM WITH VARIABLE HYSTERESIS STRUCTURE SYNTHESIS AS AN ALTERNATIVE TO SLIDING MODE CONTROL

D.A. Ragazin, B.K. Chostkovsky

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *The paper researches algorithms for controlling relay systems with negative variable hysteresis in the static characteristic of the control device and variable structure. These algorithms simplify the control device by excluding the time variable from the control law. A comparison with the sliding control mode using the derivative in the control law is made. The described control algorithms are examined by the example of a ventilation and heating system with a three-point valve as a control device. Digital modeling of*

*Dmitry A. Ragazin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Boris K. Chostkovsky (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*

the developed algorithms confirms the effectiveness of their use in a wide range of controlled objects for a number of qualitative indicators of the relay automatic control systems functioning. It is shown that the transition characteristics of automatic control systems under the same initial conditions have a monotonous character and the same transition time. At the same time, the control with negative variable hysteresis is easier to implement and configure.

Keywords: *relay control system, variable structure, sliding mode, quasi-sliding mode, static error, ventilation and heating system, HVAC, negative variable hysteresis.*

REFERENCES

1. *Emelyanov S.V.* Automation control systems with variable structure. – Moscow: Nauka, 1970. – 598 p. (In Russian)
2. *Utkin V.I.* Sliding modes in optimization and control tasks. – Moscow: Nauka, 1981. – 368 p. (In Russian)
3. *Ragazin D.A., Vohryshev V.E.* Quasi-sliding processes in relay systems with negative variable hysteresis. Bulletin of the Samara State Technical University. A series of “Technical Sciences”. № 1(21). 2008. Pp. 5–9. (In Russian)
4. *Pupkov K.A., Egupov N.D.* Methods of modern automatic control theory. T. 5. Moscow: Bauman MSTU, 2004. 784 p.
5. *Feofilov S.V.* Self-oscillation analysis in systems with a three-position relay element and digital control. Bulletin of the Tula State University. A series of “Control Systems” № 1. 2008. Pp. 161–165. (In Russian)
6. *Bondar E.S.* Automation of ventilation and air conditioning systems: Учеб. пособие. Kiev: Avanpost-Prim, 2005. 560 p. (In Russian)
7. *Kochetkov S.A., Utkin V.A.* Invariance in systems with non-ideal relay elements. UBS, 2009, № 27. Pp. 117–168. (In Russian)
8. *Simonyants R.P., Averyanov P.V.* Synthesizing relay-based spacecraft attitude control and stabilization ensuring high quality without velocity sensors. Bulletin of the Bauman Moscow State University. A series of “Instrument Engineering”. 2018. № 3(120). Pp. 104–119. (In Russian)
9. *Utkin V., Jurgen G., Jingxin S.* Sliding mode Control in Electro-Mechanical Systems. Second edition. Boca Ration, London, New York: Taylor & Francis Group, 2009. 504 p.
10. *Shtessel Y., Edwards C., Fridman L., Levant A.* Sliding mode Control and Observation. New York, Heidelberg, Dordrecht: Springer. 2010. 369 p.
11. *Utkin V.I., Chang H.-C., Keyhani A.* Sliding mode control for automobile air conditioner, IFAC 2002. Barcelona, Spain.
12. *Ragazin D.A., Vohryshev V.E.* Sliding modes in control systems. Actual problems of pedagogy and psychology of higher education. Samara: SSACA, 2008, № 6. Pp. 179–187. (In Russian)
13. *Vohryshev V.E.* Self-adapting algorithms for elimination of static errors in automatic linear and self-oscillating non-linear systems of the dynamic objects stabilizing. Bulletin of the Samara State Technical University. A series of “Technical Sciences”. № 4(36). 2012. Pp. 19–24. (In Russian)
14. *Baklanov A.S., Vohryshev V.E.* Relay systems with variable structure and passive adaptation Bulletin of the Samara State Technical University. A series of “Technical Sciences”. 2015. № 2 (46). Pp. 7–12. (In Russian)
15. *Chostkovskiy B.K., Kolpashchikov S.A.* Design of dynamic object finite positioning system digital controller. Bulletin of Samara State Aerospace University. 2010. № 2(22). Pp. 238–240. (In Russian)

УДК 658.51

МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

С.В. Сусарев

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

***Аннотация.** При создании и эксплуатации системы беспилотных автомобилей для агротехнических предприятий большое значение имеет организация технического обслуживания и ремонта. В статье предлагается методика оценки эффективности функционирования роботизированных транспортных средств с точки зрения эксплуатации и технического обслуживания. Предложено использовать метод анализа среды функционирования, базирующийся на моделях дробно-рационального программирования. Определены параметры роботизированных транспортных средств, по которым проводится сравнительная оценка. Основными показателями эффективности системы технического обслуживания и ремонта являются: коэффициент простоя при техническом обслуживании, коэффициент сходов автомобиля с линии, надежность узлов автомобиля, остаточный ресурс, пробег в месяц, удельная стоимость эксплуатации и технического обслуживания. Базовыми моделями выбраны модели Купера – Чарнеса – Роудса и Банкера – Чарнеса – Купера с использованием построения границы суперэффективности. Выполнен анализ решений для различных подмножеств параметров роботизированных автомобилей. Построены диаграммы множества производственных возможностей и определены целевые изменения параметров автомобилей и системы технического обслуживания для достижения границы эффективности. Проведена оценка развития системы технического обслуживания с использованием индекса Малмквиста, выявлены причины неудовлетворительной эксплуатации роботизированных автомобилей. Сделаны выводы по улучшению организации системы технического обслуживания.*

***Ключевые слова:** системный анализ, эффективность, техническое обслуживание транспортных средств, беспилотные автомобили, анализ среды функционирования, индекс Малмквиста.*

Введение

Современное развитие робототехники в области транспортных средств приводит к задачам управления не только маршрутизацией и движением на местности, но и техническим обслуживанием и ремонтом роботизированных автомобилей. Беспилотные грузовые автомобили представляют собой сложную киберфизическую систему, объединяющую как агрегаты и механические узлы, так и автономные подсистемы управления, контроля и передачи информации. Наличие большого числа датчиков позволяет в реальном времени получать достаточный объем измерительной информации о техническом состоянии роботизированного автомобиля.

Сусарев Сергей Васильевич (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами».

Кибер-физический подход [1, 2] к проектированию робототехнических транспортных средств заключается в создании комплекса моделей, которые описывают состояние узлов, динамику движения, прогнозируют появление отказов и предаварийных состояний.

Это позволяет организовать систему технического обслуживания роботизированных автомобилей с использованием новых информационных средств, технологий Интернета вещей (Internet of Things – IoT) и методов прогнозирования. При этом возникает задача комплексной оценки эффективности существующей организации технического обслуживания и выработки направлений совершенствования диагностики, обслуживания и ремонта роботизированных автомобилей.

В статье рассматривается роботизированная система сельскохозяйственных автомобилей (РССА) на базе моделей КАМАЗ [3, 4]. Поставлена задача разработки метода и программной реализации определения основных технических и эксплуатационных параметров, влияющих на качество технического обслуживания, нахождения границы эффективности в пространстве этих параметров и формирования рекомендаций по улучшению процесса обслуживания и ремонта транспортных средств.

Обзор существующих решений

В настоящее время зарубежные разработки в сфере роботизированных беспилотных комплексов предполагают создание транспортных средств, областью эксплуатации которых в подавляющем большинстве случаев являются логистические процессы на асфальтовых покрытиях и передвижение по дорогам общего назначения, оборудованных элементами придорожной инфраструктуры. При этом проблемы передвижения по поверхностям с изменяющимися стохастическими характеристиками не рассматривается. В то же время работа сельскохозяйственных автомобилей в тяжелых полевых условиях выдвигает на передний план создание эффективной системы технического обслуживания и ремонта.

Основные известные работы ведутся в области определения оптимального срока эксплуатации автомобиля, обеспечивающего контроль соответствия качества роботизированного автомобиля современным критериям и требованиям по надежности, конструктивной и экологической безопасности [5, 6]. Основным методом проведения контрольных работ является диагностика, которая служит для определения технического состояния автомобиля и агрегатов без разборки. Диагностика является частью технологического процесса технического обслуживания и текущего ремонта автомобилей, обеспечивая получение исходной информации о техническом состоянии автомобиля [7]. В статье [8] описана система диагностики роботизированного автомобиля, использующая интеллектуальные технологии для определения технических состояний.

В работах [8, 9] разрабатывались научные методы, позволяющие формировать алгоритмы оптимизации в системе технического обслуживания и ремонта автомобилей с учетом требований среды эксплуатации по нескольким критериям эффективности. Сформулирована модель многокритериальной структуры показателей эффективности автомобиля.

Однако решение такой задачи требует оценки, насколько эффективно функционирует система технического обслуживания в различные периоды времени. Следует определить, какие процедуры технического обслуживания и ремонта в РССА отвечают принятым критериям качества, степень информативности вы-

бренных параметров контроля надежности и работоспособности. Сложность оценки связана с необходимостью сравнивать различные модели транспортных средств, работающих в разных условиях эксплуатации. В этом случае целесообразно использовать метод анализа среды функционирования (АСФ, или Data Envelopment Analysis) [10, 11], который успешно применялся в задачах оценки эффективности в различных приложениях [12–15].

Модели технического обслуживания и ремонта для роботизированной системы автомобилей

Роботизированная система сельскохозяйственных автомобилей (РССА) на базе семейства автомобилей КАМАЗ с автономным и дистанционным режимами управления предназначена для работы на сельскохозяйственных площадях. На рис. 1 показана общая структура РССА.

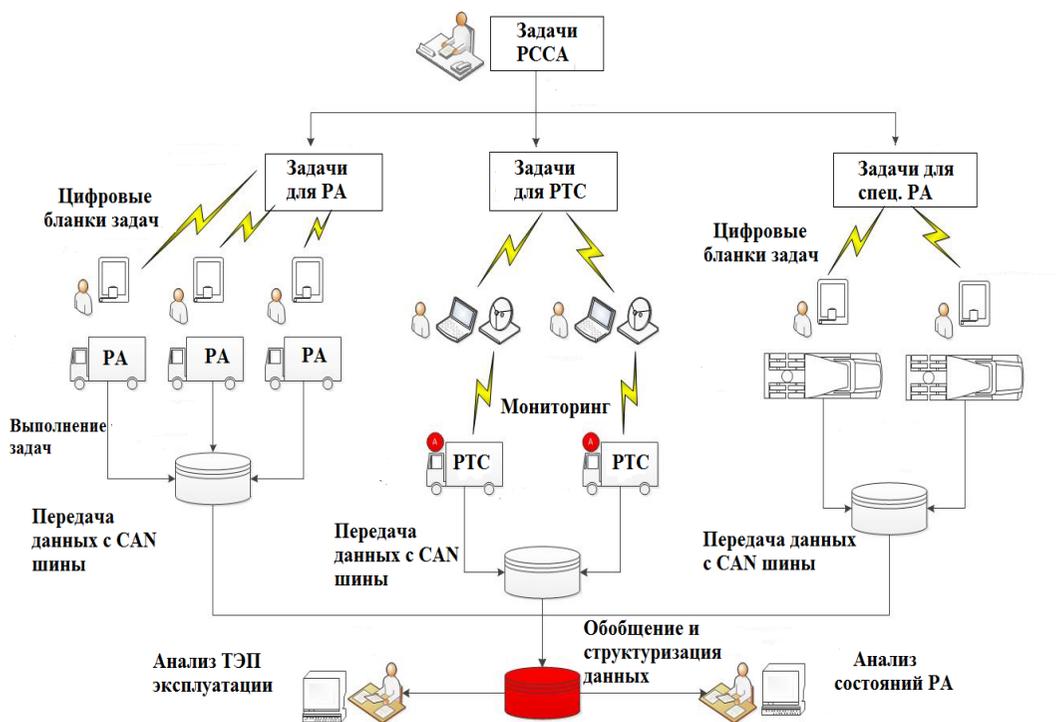


Рис. 1. Структурная схема иерархической организации РССА

Иерархическую структуру РССА образуют:

1. Три группы автомобилей различного назначения:
 - а) роботизированные автомобили РА для работы в полях;
 - б) роботизированные транспортные средства РТС для перемещения грузов на производственных площадках сельскохозяйственных предприятий;
 - в) специализированные автомобили на шасси КАМАЗ.
2. Два уровня дистанционного управления с помощью операторов.
3. Система сбора в реальном времени данных о техническом состоянии автомобилей с использованием CAN шины.
4. Аналитическая подсистема для оценки технико-экономических параметров эксплуатации и обслуживания роботизированных транспортных средств.

Наличие развитой информационной системы в РССА, использование «цифровых двойников» позволяют организовать процессы технического обслуживания и ремонта роботизированных автомобилей на новом уровне. На рис. 2 приведена структурная схема взаимодействия компонентов РССА: систем диагностики, эксплуатантов, сервисных служб и производителей транспортных средств.



Рис. 2. Схема взаимодействия в рамках РССА при организации технического обслуживания роботизированных автомобилей

В основу технологического процесса технического обслуживания РА положены следующие методы.

1. Метод DFMEA (Design – Failure Mode & Effects Analysis) – «Анализ эффектов режима отказа проекта». Эта методология помогает выявить потенциальные сбои в конструкции продукта на стадии разработки.

2. Метод PFMEA (Process – Failure Mode & Effects Analysis) – «Анализ последствий режима отказа процесса», который помогает идентифицировать возможные режимы отказа процесса при управлении операциями и проектирование на этапе разработки роботизированного автомобиля для РССА, а также классифицировать отказы на основе вероятности и серьезности сбоя. Основная цель DFMEA состоит в обнаружении потенциальных сбоев в конструкции роботизированного автомобиля, тогда как основная цель PFMEA – выявить потенциальные сбои в процессах его эксплуатации.

3. APQP (Advanced Product Quality Planning) – метод перспективного планирования качества продукции, который позволяет оптимизировать рабочий процесс в РССА, повысить качество роботизированных автомобилей и значительно снизить издержки и затраты производства, связанные с изготовлением и дальнейшим устранением бракованной продукции.

Проблема обеспечения оптимального функционирования сложной системы РССА неразрывно связана с постоянным контролем надежности и ее комплексной оценкой. Авторы данной статьи разработали моделиориентированный подход к удаленной диагностике, использующий кибер-физические модели [16, 17].

Этот подход позволяет осуществлять сбор информации о причинах дефектов и отказов, параметрах предотказного состояния, последствиях отказов, параметрах надежности элементов, систем и агрегатов и осуществлять анализ собранной информации.

Остаточный ресурс узла, системы или агрегата автомобиля формируется на основе остаточных ресурсов составляющих его агрегатов и элементов. Диагностическая система в режиме онлайн получает всю необходимую измерительную информацию о техническом состоянии РА. Модель РА представляет собой «цифровой двойник». С помощью такой модели проводится анализ и прогнозирование работы агрегатов роботизированного автомобиля. Система принятия решений использует базу знаний для выработки управляющих воздействий на автомобиль.

Описанные системы и технические средства используются для получения исходных данных о роботизированных автомобилях при решении задачи комплексной оценки эффективности технического обслуживания и ремонта.

Оценка эффективности технического обслуживания РССА с использованием моделей АСФ

Использование методики анализа среды функционирования базируется на решении оптимизационной задачи дробно-рационального программирования. Особенность подхода состоит в том, что не рассматриваются какие-либо частные критерии и не определяются функции, связывающие входные и выходные переменные объектов. Для каждого анализируемого объекта DMU формируется некоторое множество параметров, описывающих функционирование этого объекта. Оцениваемые объекты могут быть разнородными, но должны функционировать в среде с одинаковыми целями. В этом случае их сравнение производится по интегральному критерию, но при этом решается последовательно n задач дробно-рационального программирования для каждого оцениваемого объекта с целью определения неизвестных весов целевой функции [10].

В данной статье рассматривается, с точки зрения организации технического обслуживания и ремонта, функционирование множества роботизированных автомобилей, входящих в состав РССА.

Анализ эффективности проводится с использованием моделей ССР (Купер – Чарнес – Роудс) и ВСС (Банкер – Чарнес – Купер) с построением границы суперэффективности [18, 19]. Такие модели позволяют на базе реальных эффективных объектов сформировать искусственные объекты с эффективностью, большей единицы. Искусственные объекты с суперэффективностью служат как цели для повышения эффективности реальных объектов.

Суперэффективность DMU вычисляется путем его оценки по отношению ко всем DMU, за исключением самого себя. Это означает, что DMU может иметь показатель эффективности выше 100 %.

Математическая постановка задачи формулируется следующим образом. Пусть имеется множество оцениваемых роботизированных автомобилей DMU_j , $j=1, \dots, n$, а также векторы их входных $x_j = (x_1^j, \dots, x_m^j)$ и выходных $y_j = (y_1^j, \dots, y_k^j)$ параметров, m – число входов и k – число выходов для DMU.

Для нахождения критерия θ суперэффективности выполняется решение задачи дробно-линейного программирования:

$$\theta = \max \left(\frac{\sum_{r=1}^k u_r y_{r0} + u_0}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i0}} \right) \quad (1)$$

при ограничениях

$$\frac{\sum_{r=1}^k u_r y_{rj} + u_0}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1, \quad j = \overline{1, n}, \quad (2)$$

$$1 \leq \frac{\sum_{r=1}^k u_r Y_{r0} + u_0}{\sum_{i=1}^m v_i X_{i0}} \leq 1 + \rho, \quad (3)$$

$$L_{i0}^x \leq X_{i0} \leq V_{i0}^x, \quad i = \overline{1, m},$$

$$L_{r0}^y \leq Y_{r0} \leq V_{r0}^y, \quad r = \overline{1, k},$$

$$u_r, v_i \geq 0, \quad \forall i, \forall r, \quad u_0 - \text{свободно},$$

где (2) – ограничения для реальных эффективных объектов;

(3) – ограничение для нового искусственного объекта;

X_{i0} и Y_{r0} – искомые значения входов и выходов искусственного эффективного объекта.

Величина ρ , а также верхние V_{i0}^x, V_{r0}^y и нижние L_{i0}^x, L_{r0}^y границы диапазона входов и выходов искусственного объекта определяются с помощью экспертных оценок.

Исследование эффективности обслуживания роботизированных автомобилей в составе РССА

В примере, иллюстрирующем предлагаемую методику, будем рассматривать совокупность из двух групп беспилотных автомобилей:

- роботизированные автомобили РА для полевых работ, {A1, A2, ..., A8};
- роботизированные транспортные средства РТС для сельхозпредприятий, {T1, T2, T3, T4}.

В соответствии с принятыми в автомобильной промышленности критериями [7] устанавливаются показатели эффективности работы РССА, приведенные в табл. 1. В табл. 2 и табл. 3 приведены значения параметров роботизированных автомобилей для двух периодов эксплуатации: 2019 год и 2020 год. В роли DMU рассматриваются наборы {A1, A2, ..., A8} и {T1, T2, T3, T4}.

Анализ технического обслуживания комплекса роботизированных автомобилей выполнялся на основе модели CCRinput с неуменьшаемым эффектом масштаба NDRS. Задавался режим нахождения границы суперэффективности Super Efficiency with Threshold с порогом $\rho = 10\%$.

Таблица 1

Показатели для оценки эффективности

Обозначение	Показатель эффективности
P1	Средняя скорость движения автомобиля РА в наблюдаемый период, км/ч
P2	Потребление топлива автомобилем РА, л/(100 км)
P3	Пробег месячный, км
P4	Коэффициент простоя на ТО и Р, %
P5	Средняя надежность узлов и агрегатов автомобиля РА, %
P6	Коэффициент сходов с линии, %
P7	Удельная стоимость эксплуатационного и технического обслуживания (на 1 тонну перемещенного груза), руб/т
P8	Удельное грузоперемещение, т/км
P9	Остаточный ресурс автомобиля, часы наработки на отказ, час

Таблица 2

Параметры P1–P5 в периоды 2019 г. и 2020 г.

Объекты	Параметры									
	P1 км/час		P2 л		P3 км		P4 %		P5 %	
	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020
A1	25	30	35	32,3	2700	3100	1	0,72	93	96
A2	36	36	30	30	3200	3400	0,6	0,45	96,5	98
A3	30	27	34	34,5	3000	2800	0,77	1,1	95	91
A4	36	34	31	30,1	3200	3050	0,7	0,8	97	97
A5	35	34	29	27	3250	3350	0,6	0,1	98	98
A6	26	29	36	33	2800	3050	0,85	0,7	89	93
A7	29	29,6	33	32	3100	3300	0,73	0,3	95	97
A8	31	32	32	32	2900	3100	0,75	0,71	94	94
T1	24	29	36	34	2750	3100	0,9	0,7	88	92
T2	26	30	37	32,5	2650	3270	1,1	0,6	90	96
T3	37	30	29	28,5	3400	2800	0,65	1	97	90
T4	35	35	28	30	3600	3700	0,62	0,72	97,5	97

Важный момент при применении метода АСФ – правильное деление показателей на входные и выходные параметры. В рассматриваемом примере были определены множество входных параметров $X = \{P2, P4, P6, P7, P9\}$ и множество выходных параметров $Y = \{P1, P3, P5, P8\}$.

Решение задач для моделей АСФ проводилось с использованием программы PIM DEASoft версии 3 [20].

Основная задача моделирования – определение для каждого j -го автомобиля целевых изменений δ_{jl} его параметров для выхода на границу эффективности:

$$\delta_{jl} = \frac{P_{jl}^r - P_{jl}^D}{P_{jl}^D} \times 100\%, \quad j = \overline{1,12}, \quad l = \overline{1,9},$$

где P_{jl}^D – измеренное значение параметра, P_{jl}^r – целевое значение.

Таблица 3

Параметры P6–P9 в периоды 2019 г. и 2020 г.

Объекты	Параметры							
	P6 %		P7 руб/т		P8 т/км		P9 час×10 ⁴	
	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020
A1	2	0,1	12	9,5	0,14	0,2	15	16
A2	0,6	0,2	8	7	0,22	0,25	19	19
A3	1,2	2	10,3	13	0,18	0,2	17	15
A4	0,7	0,45	7,8	8	0,21	0,2	18	18
A5	0,66	0,3	7,4	7	0,27	0,4	18,1	18
A6	1,6	1,2	11,5	9,5	0,11	0,22	16,2	17,3
A7	1	0,4	10	9,8	0,2	0,32	17,5	18,5
A8	0,95	0,88	9	10	0,16	0,165	17,1	16,7
T1	1,8	0,5	12,3	11	0,12	0,23	16,1	17,2
T2	1,4	0,3	11,8	12	0,11	0,19	15,6	16,8
T3	0,5	2,3	8,6	10	0,23	0,17	18,2	16
T4	0,57	0,8	7,9	8,2	0,28	0,28	17,9	18,2

Таблица 4

Целевые изменения параметров роботизированных автомобилей в 2019 г.

Объекты	Изменение параметров, %								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
A1	0	46,57	27,42	41,38	39,69	38,32	64,25	0	33,83
A2	32,08	-10,03	5,58	13,53	0	13,53	13,53	22,19	10,46
A3	0	1,36	11,66	-29,94	1,85	-41,62	-31,66	0	-22,32
A4	0	0,65	2,9	-2,4	17,15	0,65	-19,96	36,89	-8,43
A5	17,14	-1,12	0	-1,12	1,13	-73,66	-6,41	0	-5,98
A6	27,57	5,84	23,67	-15,61	0	3,27	-23,73	0,71	5,84
A7	0	-2,32	44,54	-11,05	0	-2,32	-7,71	44,94	-12,36
A8	33,65	14,02	0	14,02	11,36	14,02	-2,98	74,04	14,02
T1	0	20,44	52,58	30,69	31,52	60,45	22,16	5,16	13,16
T2	0	4,81	0	-38,23	4,24	4,81	-31,43	63,43	-3,01
T3	0	13,09	0	-5,04	0	-43,59	13,09	80,32	-13,1
T4	47,73	5,99	11,03	5,99	0	-42,41	-19,55	29,93	-13,09

Результаты расчетов сведены в табл. 4, в которой показаны процентные значения целевых изменений параметров для РА в 2019 году для планирования повышения эффективности в 2020 году.

Графический интерфейс программы PIM DEASoft позволяет визуально оценивать положение объектов относительно границы эффективности. На рис. 3 показана диаграмма PPS (Production Possibility Set) – множество производственных возможностей в пространстве параметров P4 и P8. Для достижения границы эффективности автомобилем A1 в результате технического обслуживания в 2020 году должны измениться параметры:

а) увеличиться удельное грузоперемещение до 0,27 т/км при неизменном коэффициенте простоя на ТО и ремонт;

б) либо уменьшиться коэффициент простоя до 0,6 % при неизменном удельном грузоперемещении.

Второй вариант предпочтительнее, так как снижение коэффициента простоя приводит к улучшению других параметров, например к увеличению месячного пробега.

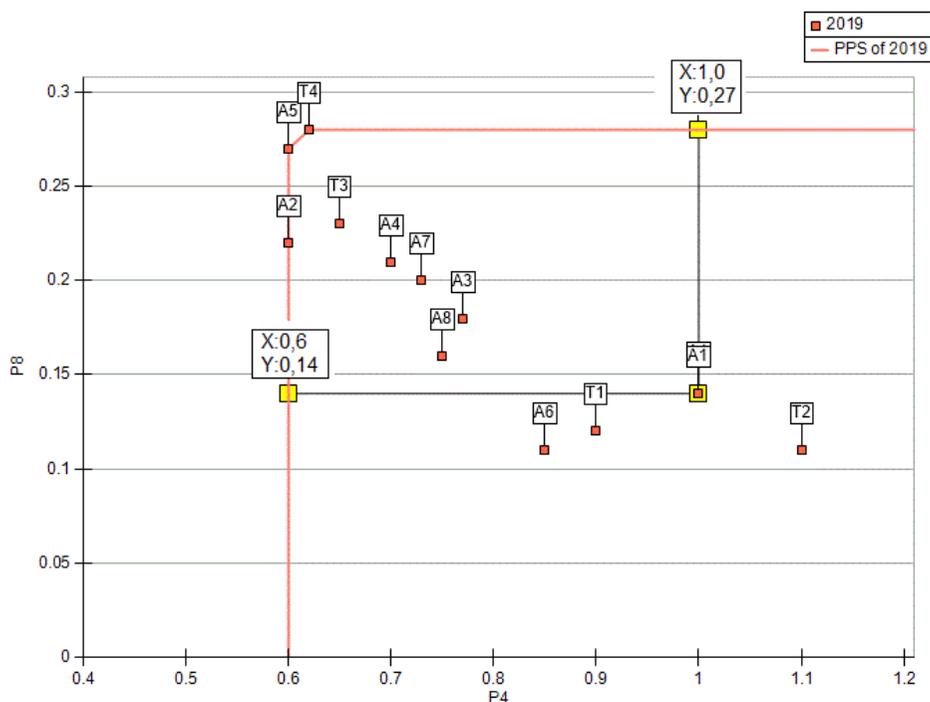


Рис. 3. Целевые изменения параметров P4 и P8 для выхода автомобиля A1 на границу эффективности

Представляет интерес сравнение границ эффективности для различных периодов времени.

На рис. 4 показаны границы эффективности для двух периодов (2019 и 2020 годы) и расположение всех оцениваемых РА для двух входов P4 и P6 относительно выхода P1 – средней скорости движения РА.

График на рис. 4 показывает, что в пространстве этих параметров в 2019 году наименее эффективными были автомобили A1, A6 и T1, T2. Они расположены далеко от границы эффективности. В результате принятых мер по улучшению технического обслуживания в 2020 году автомобиль A1 вышел на границу эффективности (траектория – пунктирная линия), а T1 и T2 переместились значительно ближе к границе. В то же время автомобиль A3, который в 2019 году был на среднем удалении от границы эффективности, в 2020 году показал наихудшие результаты и на графике наиболее удален от границы (стрелка). Из табл. 2 и 3 видим, что для A3 в 2020 году зафиксированы: уменьшение средней скорости

и месячного пробега, увеличение простоя на ТО, снижение надежности агрегатов и остаточного ресурса.

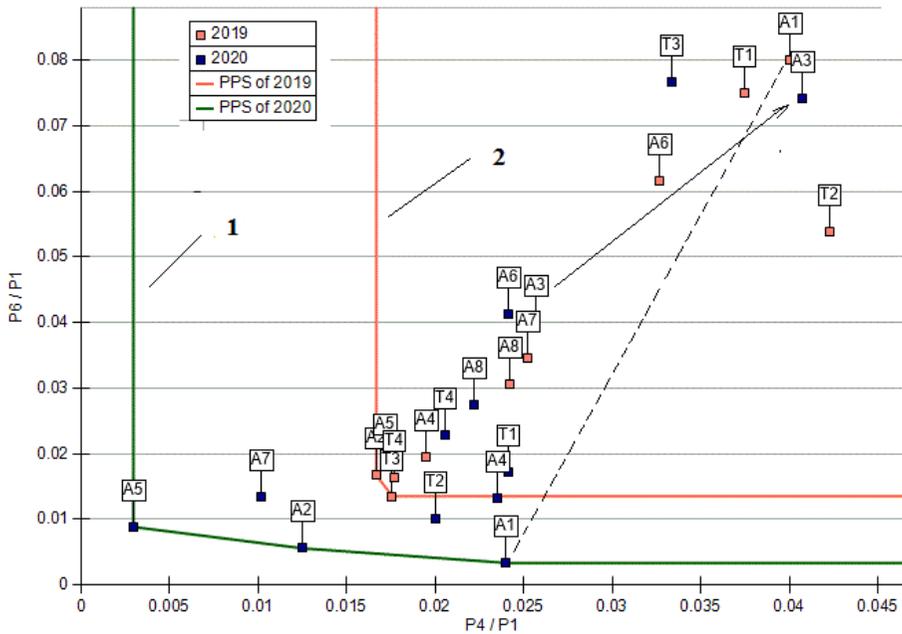


Рис. 4. Положение роботизированных автомобилей относительно границ эффективности в 2019 и 2020 году в зависимости от параметров $P4$, $P6$ и $P1$:
1 – 2020 год; 2 – 2019 год

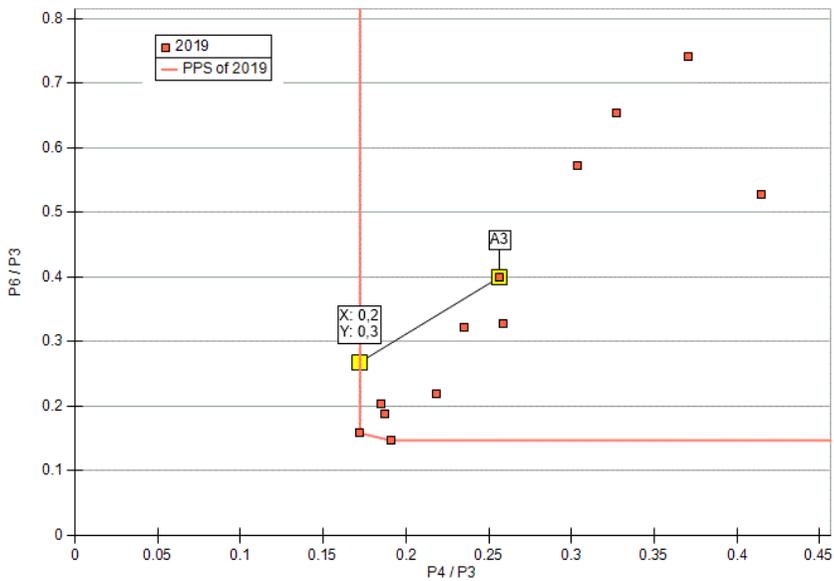


Рис. 5. Положение A3 относительно границы эффективности и целевые изменения $P4$ и $P6$

Целевые изменения параметров для АЗ, принятые в 2019 году, иллюстрируются на рис. 5. Здесь рассматривается выходной параметр Р3 – пробег месячный.

Параметры Р4 и Р6 характеризуют качество технического обслуживания: Р4 – время, затраченное на регламентные и ремонтные работы, Р6 – частоту появления событий, приводящих к прекращению выполнения автомобилем заданий на линии. Однако по результатам 2020 года автомобиль АЗ не достиг границы эффективности.

Анализ данной ситуации показал, что для автомобиля АЗ не были выполнены целевые изменения параметров, которые рекомендовались в соответствии с табл. 4. В табл. 5 выполнено сравнение значений параметров, которые планировались для повышения эффективности автомобиля АЗ, с реально достигнутыми значениями в 2020 году.

Таблица 5

Целевые и реальные параметры роботизированного автомобиля АЗ

Параметр	2019 г.	Целевое значение на 2020 г.	Реальное значение в 2020 г.
Р1	30	31,27	27
Р2	34	30	34,5
Р3	3000	3264	2800
Р4	0,77	0,76	1,1
Р5	95	95,82	91
Р6	1,2	1,1	2
Р7	10,3	9,43	13
Р8	0,18	0,23	0,2
Р9	17	16,82	15

Очевидно, что техническое обслуживание и ремонт АЗ были выполнены некачественно, что привело к следующим нежелательным последствиям:

- снижения потребления топлива Р2 не произошло, но при этом уменьшилась средняя скорость, что привело к уменьшению месячного пробега Р3;
- коэффициент сходов автомобиля с линии вырос в два раза, что привело к росту эксплуатационных расходов Р7;
- надежность агрегатов и остаточный ресурс уменьшились.

Аналогичные выводы можно сделать и по другим роботизированным автомобилям, что позволяет скорректировать режимы технического обслуживания и ремонта на следующий период времени.

В результате проведенных исследований определены направления развития системы технического обслуживания и ремонта роботизированных автомобилей РССА в следующих аспектах:

1. Снижение времени простоя РА на ТО и ремонте за счет постоянного дистанционного мониторинга технического состояния РА во время эксплуатации.
2. Использование «цифровых двойников» РА для прогнозирования отказов агрегатов и их заблаговременного обслуживания или замены. Это приведет к снижению коэффициента схода РА с линии.
3. Уменьшение затрат на техническое обслуживание и ремонт РА.

Анализ эффективности роботизированных автомобилей с помощью индекса Малмквиста

Индекс Малмквиста дает возможность оценивать развитие объектов на двух периодах времени. В статье используется методология DEA-Malmquist, которая основана на моделях CCR [10, 15].

В экспериментах для определения индекса Малмквиста была использована модель CCR_{input} с постоянным масштабом отдачи CRS без суперэффективности. Результаты работы программы приведены в табл. 6, где MI – индекс Малмквиста, EC – технический прогресс, TC – изменение эффективности. В такой интерпретации индекс Малмквиста представляется как произведение

$$MI = EC \cdot TC.$$

Величина индекса $MI > 1$ свидетельствует о прогрессе в производительности оцениваемого РА в период от t до $t+1$, тогда как $MI = 1$ или $MI < 1$ соответствуют неизменному состоянию или снижению фактора производительности.

Таблица 6

Индекс Малмквиста для роботизированных автомобилей (2019–2020 гг.)*

Индекс	Объекты (РА)											
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	T1	T2	T3	T4
TC	2,2	1,63	0,95	1,04	2,95	1,04	1,62	1,01	1,04	1,3	0,97	0,99
EC	1	1	0,98	0,99	1	0,98	0,98	1,02	1,01	1,02	0,99	1
MI	2,2	1,63	0,93	1,03	2,95	1,02	1,58	1,04	1,05	1,33	0,96	0,99
Тенденция изменения качества ТО для РА	+	+	–	0	+	0	+	0	0	+	–	–

*Здесь обозначены:

+ качество ТО улучшилось;

– качество ТО ухудшилось;

0 – качество ТО не изменилось.

Положительная тенденция развития наблюдается для роботизированных автомобилей A1, A2, A5 и A7, а также роботизированного транспортного средства T1. Индекс Малмквиста имеет максимальное значение для A1, что свидетельствует о значительном прогрессе этого автомобиля по эксплуатационным параметрам. Это видно и на рис. 4, где показана траектория (пунктирная линия) перемещения A1 от точки неэффективности в 2019 году до границы эффективности в 2020 году.

Ухудшение параметров наблюдалось для A3, T3 и T4. Это подтверждено также анализом расположения указанных РА относительно границ эффективности.

Заключение

Предлагаемая методика обеспечивает принятие решений при организации технического обслуживания и выборе технологических операций для роботизированных автомобилей. Модели анализа среды функционирования предоставляют большой объем информации, обработка которой дает возможность выявить

неочевидные закономерности и связи между параметрами автомобиля, показателями обслуживания, условиями эксплуатации.

Дальнейшее направление исследований связано с детальным анализом функционирования РССА и включением в рассматриваемые модели новых наборов показателей эффективности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Khaitan S.K., McCalley J.D.* Design techniques and applications of cyber physical systems: A survey // *IEEE Systems Journal*, 2015. 15 p.
2. *Lee E.A., Seshia S.A.* Introduction to embedded systems. A Cyber-Physical Systems approach. 2nd edition. The MIT Press, 2017.
3. *Сусарев С.В., Сидоренко К.В., Морев А.С., Гащенко Ю.В.* Принципы построения систем управления роботизированных транспортных средств с автономным и дистанционным режимом управления // *Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XXI Международной конференции.* – Самара: Офорт, 2019. – С. 107–110 .
4. *Orlov S.P., Susarev S.V., Kravets O.Ya., Morev A.S.* Information system of agricultural robotic KAMAZ cars // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1399 (033020). P. 1–5.
5. *Ляпин Н.А., Ширяев С.А., Федин А.П., Полуэктов М.В.* Современные системы технического обслуживания и ремонта грузовых автомобилей / под ред. Н. А. Ляпина. – Волгоград: ВолгГТУ, 2016. – 188 с.
6. *Коваленко Н.А.* Организация технического обслуживания и ремонта автомобилей. – М.: ИНФРА-М, 2016. – 229 с.
7. *Сусарев С.В., Орлов С.П., Пугачев А.И.* Интеллектуальная система диагностики агрегатов роботизированного автомобиля КАМАЗ // *Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XXI Международной конференции (3–6 сентября 2019 г., Самара, Россия).* – Самара: Офорт, 2019. – С. 92–95.
8. *Терентьев А.В.* Научно-методический подход к многокритериальной оценке срока эксплуатации автомобиля: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук: 05.22.10. – Санкт-Петербург: СПб. гос. арх.-строит. ун-т., 2019. – 44 с.
9. *Терентьев В.А., Ефименко Д.* К вопросу многокритериальной оценки срока эксплуатации автомобиля // *Мир транспорта и технологических машин.* – 2018. – № 1(60). – С. 21–27.
10. *Cooper W.W., Seiford L.M., Tone K.* Data envelopment analysis: a comprehensive text with models, applications, references and DEA-solver software. 2nd edition. Springer Science + Business Media, 2007. 492 p.
11. *Cooper W.W., Seiford L.M., Zhu J.* Data Envelopment Analysis: History, Models, and Interpretations. Handbook on Data Envelopment Analysis. Springer, Boston, MA, 2011, P. 1–39.
12. *Нечаев Д.А., Орлов С.П.* Комплексная оценка и классификация объектов водоснабжения регионов // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки.* – 2013. – Вып. 1(37). – С. 14–21.
13. *Рыбакова И.А., Орлов С.П.* Сравнительный анализ эффективности использования предприятиями CRM-систем // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки.* – 2018. – Вып. 1(57). – С. 31–37.
14. *Учайкин Р.А., Орлов С.П.* Сравнительная оценка эффективности компьютерной техники в подразделениях промышленного предприятия // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки.* – 2020. – Т. 28. – № 1(65). – С. 74–86.
15. *Лиссумса А., Бабичева Т.* Теоретические основы анализа продуктивности и эффективности сельскохозяйственных предприятий // *Discussion paper. Institute of Agricultural Development in Central and Eastern Europe. Halle (Saale), Deutschland.* 2003. No. 49. 39 p.
16. *Susarev S.V., Orlov S.P.* Application of DEA models in efficiency evaluation of the KAMAZ vehicle robotic system // *IOP Conference Series: Mater. Sci. Eng.* 2020. Vol. 919. 052056.
17. *Orlov S.P., Susarev S.V., Morev A.S., Kravets O.Ya.* Digital tests of the robotic chassis cyber-physical system for agricultural unmanned vehicle // *Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference.* 2019. Vol. 1399 (044032). P. 1–6.
18. *Andersen P., Petersen N.C.* A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis // *Management Science.* 1993. Vol. 39. P. 1261–1264.
19. *Sowlati T., Paradi J.C.* Establishing the "practical frontier" in data envelopment analysis // *Omega.* 2004. Vol. 32 (4). P. 261–272.

20. PIM-DEA. Home page. Режим доступа: <http://www.deasoftware.co.uk/> (дата обращения 22.09.2020).

Статья поступила в редакцию 3 октября 2020 г.

MODELS FOR THE ASSESSMENT OF ROBOTIC VEHICLE MAINTENANCE EFFICIENCY

S.V. Susarev

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *Maintenance and repair are of great importance in creating and operating a system of unmanned vehicles for agricultural enterprises. The article proposes a methodology for assessing the effectiveness of robotic vehicles' functioning in terms of operation and maintenance. It is suggested to use the method of Data Envelopment Analysis based on fractional rational programming models. The parameters of robotic vehicles have been determined, for which a comparative assessment is carried out. The leading indicators of the maintenance and repair system efficiency are the downtime ratio for maintenance, the vehicle drift rate from the line, the reliability of the vehicle aggregates, robotic vehicle residual life, mileage per month, and the operation and maintenance unit cost. The basic models are the Cooper – Charnes – Rhodes and Bunker – Charnes – Cooper models using the super-efficiency frontier's construction. The analysis of solutions for various subsets of parameters of robotic vehicles is carried out. The production possibility set diagrams are plotted, and target changes in vehicles' parameters and the maintenance system are determined to achieve the efficiency frontier. The development of the maintenance system was assessed using the Malmquist index, and the reasons for the unsatisfactory operation of robotic vehicles were identified. Conclusions are made to improve the organization of the maintenance system.*

Keywords: *system analysis, efficiency, maintenance of vehicles, unmanned vehicles, Data Envelopment Analysis, Malmquist index.*

REFERENCES

1. *Khaitan S.K., McCalley J.D.* Design techniques and applications of cyber physical systems: A survey // IEEE Systems Journal, 2015. 15 p.
2. *Lee E.A., Seshia S.A.* Introduction to embedded systems. A Cyber-Physical Systems approach. 2nd edition. The MIT Press, 2017.
3. *Susarev S.V., Sidorenko K.V., Morev A.S., Gashenko Yu.V.* Principles of building control systems for robotic vehicles with autonomous and remote control modes // Proceedings of the XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems. Samara: "Ofort", 2019. P. 107–110.
4. *Orlov S.P., Susarev S.V., Kravets O.Ya., Morev A.S.* Information system of agricultural robotic KAMAZ cars // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1399 (033020). P. 1–5.
5. *Lypin N.A., Shirayev S.A., Fedin A.P., Poluektov M.V.* Modern systems of maintenance and repair of trucks. Ed.: Lypin N.A. Volgograd: Volgtu, 2016. 188 p.
6. *Kovalenko N.A.* Organization of maintenance and repair of cars. M.: NIC INFRA-M, 2016. 229 p.
7. *Susarev S.V., Orlov S.P., Pugachev A.I.* Intelligent Diagnostic System of Robotic KAMAZ Vehicle's Units // Proceedings of the XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems. Samara: "Ofort", 2019. P. 92–95.

Sergey V. Susarev (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

8. *Terentev A.V.* Scientific and methodological approach to multi-criteria assessment of the vehicle's service life: Abstract of diss. ... Doct. Tech. Sci.: 05.22.10. Saint_Petersburg: SPBASY, 2019. 44 p.
9. *Terentev A.V., Efimenko D.K.* On the issue of multi-criteria assessment of the vehicle's service life // The world of transport and technological machines. 2018. No. 1(60). P. 21–27.
10. *Cooper W.W., Seiford L.M., Tone K.* Data envelopment analysis: a comprehensive text with models, applications, references and DEA-solver software. 2nd edition. Springer Science + Business Media, 2007. 492 p.
11. *Cooper W.W., Seiford L.M., Zhu J.* Data Envelopment Analysis: History, Models, and Interpretations. Handbook on Data Envelopment Analysis. Springer, Boston, MA, 2011, P. 1–39.
12. *Nechaev D.A., Orlov S.P.* Comprehensive assessment and classification of water supply facilities in regions // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Engineering. 2013. Vol. 1(37). P. 14–21.
13. *Rybakova I.A., Orlov S.P.* Comparative analysis of the effectiveness of the use of CRM systems by enterprises // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Engineering. 2018. Vol. 1(57). P. 31–37.
14. *Uchaykin R.A., Orlov S.P.* Comparative evaluation of computer equipment efficiency in the departments of industrial enterprise // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Engineering. 2020. Vol. 28. № 1(65). P. 74–86.
15. *Lissitsa A., Babicheva T.* Theoretical foundations of the analysis of the productivity and efficiency of agricultural enterprises // Discussion paper. Institute of Agricultural Development in Central and Eastern Europe. Halle (Saale), Deutschland. 2003. No. 49. 39 p.
16. *Susarev S.V., Orlov S.P.* Application of DEA models in efficiency evaluation of the KAMAZ vehicle robotic system // IOP Conference Series: Mater. Sci. Eng. 2020. Vol. 919. 052056.
17. *Orlov S.P., Susarev S.V., Morev A.S., Kravets O.Ya.* Digital tests of the robotic chassis cyber-physical system for agricultural unmanned vehicle // Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference. 2019. Vol. 1399 (044032). P. 1–6.
18. *Andersen P., Petersen N.C.* A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis // Management Science. 1993. Vol. 39. P. 1261–1264.
19. *Sowlati T., Paradi J.C.* Establishing the "practical frontier" in data envelopment analysis // Omega. 2004. Vol. 32 (4). P. 261–272.
20. PIM-DEA. Home page. <http://www.deasoftware.co.uk/> (Available 22.09.2020).

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

СЕНСОРНЫЕ СЕТИ – РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Б.Я. Лихтциндер

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
Россия, 443010, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23

E-mail: lixt@psuti.ru

***Аннотация.** Рассматриваются задачи контроля и управления территориально распределенными объектами. Рассмотрены сенсорные сети, работающие по технологии ZigBee. Приведены характеристики стандарта 802.15.4 ZigBee. Показаны преимущества этой технологии при построении сетей, мало критичных к задержкам трафика. Рассмотрены элементы такой сети, первичные преобразователи, применяемые в этих сетях и их энергетические характеристики. Рассмотрены вопросы уменьшения и компенсации задержек в цепях управления. Показана целесообразность применения при управлении распределенными системами методов прогнозирования, которые основаны на предметно ориентированных моделях.*

***Ключевые слова:** Сенсорные сети, первичные преобразователи, измерение, управление, задержки,*

Введение

Существует множество областей, в которых необходимо контролировать ряд изменяющихся параметров объектов, расположенных на значительных расстояниях друг от друга [1].

Это охрана окружающей среды и природоохранение, контроль экологических параметров в сельском хозяйстве, контроль состояния зданий и инженерных сооружений, контроль и мониторинг транспортных средств, системы контроля и управления инженерным хозяйством, системы обнаружения и слежения, промышленное управление, мониторинг и сбор данных о технологических процессах, индивидуальное медицинское диагностирование с помощью датчиков, размещенных на перемещающемся пациенте и многое другое. Для решения таких задач используются беспроводные и проводные сенсорные сети, которые собирают информацию от распределенных в пространстве первичных преобразователей – датчиков и доставляют ее к средствам обработки, выполняя функции информационно-измерительных систем. Если получаемые данные не используются для изменения состояния контролируемого объекта, то такой процесс называют

пассивным мониторингом. Если результаты обработки используются для управления контролируемым объектом, то такая сеть может рассматриваться как распределенная информационно-управляющая система, а процесс управления называют активным мониторингом.

Распределенные информационно-измерительные системы

Информационно-измерительные системы существуют уже много лет. Различные сенсорные устройства, датчики подключались к центральному обрабатываемому устройству аналогично тому, как терминальные устройства подключались к центральной ЭВМ. Информация обрабатывалась централизованно и выдавалась потребителю. Датчики не могли размещаться на удаленном расстоянии от центральной ЭВМ и подключались с помощью специальных соединительных кабелей. Информация передавалась в аналоговом виде и преобразовывалась в цифровую форму аналого-цифровым преобразователем (АЦП), который поочередно подключался к сенсорным устройствам. АЦП были громоздкие и весьма дорогие. Потеря точности за счет передачи аналоговых сигналов послужила причиной разработки малогабаритных АЦП, которые устанавливались вблизи датчиков и передавали информации в цифровой форме. Развитие цифровой элементной базы позволило осуществить такой переход. Одновременно, уменьшались размеры цифровых обрабатывающих устройств и увеличивалась их вычислительная мощность. Появились малогабаритные контроллеры, которые собирали информацию от близлежащих датчиков. При этом уменьшилось количество соединительных линий. Вычислительные мощности приближались к измерительным преобразователям. Создание больших интегральных схем (БИС) с высоким уровнем интеграции позволило совместить контроллерную обработку информации от датчиков с самим измерительным процессом, встраивая вычислительные мощности в измерительные преобразователи. Появились «умные» сенсорные устройства, адаптирующиеся к изменению условий измерений. Уменьшились не только физические размеры устройств цифровой обработки, но уменьшалось также их энергопотребление, увеличивался срок непрерывной работы с автономным малогабаритным источником энергии. Низкая стоимость интеллектуальных сенсорных устройств привела к широкому их распространению. Информация уже собирается от сотен и даже тысяч таких устройств и возникли проблемы с их подключением к устройствам, собирающим информацию. Все шире начинаются создаваться сети, передающие информацию по радио каналам. Измерительная информация начинает передаваться по радиосетям с использованием стандартных протоколов. В указанных целях широко используются Wi-Fi – сети, характеристики которых позволяют передавать информацию на расстояние более одного километра. Однако, стандартные протоколы оказались слишком громоздкими для передачи медленно изменяющихся измерительных данных, а сами точки доступа и другие сетевые устройства оказались слишком дорогими, ввиду своей высокой универсальности. Для большинства приложений не требовалось столь высоких скоростей передачи, однако требовалось большое количество таких узлов. Размещение датчиков на больших площадях потребовало бы увеличение мощности их передатчиков, что невозможно из-за ограниченности их источников энергии. Решить проблему позволило применение MESH сетей, когда информация транслируется промежуточными приемопередатчиками. При этом приемопередатчики конструктивно объединяются с датчиками в один узел. Топология сети изменяется, сеть становится самоорганизующейся и для ее функ-

ционирования потребовались новые специальные протоколы. Так появилось понятие «беспроводные сенсорные сети» (БСС), – сети, объединяющие сенсорные преобразователи и средства передачи измерительной информации и информации управления.

Технология ZigBee

Для построения таких сетей наиболее часто применяется технология ZigBee. На сегодняшний день ZigBee является наиболее перспективной технологией для построения беспроводных сетей с небольшими объемами передаваемой информации [3-7]. Протокол ZigBee изначально разрабатывался для объединения в сеть большого количества автономных устройств, например, датчиков и выключателей с батарейным питанием. Трансиверы, отвечающие стандарту 802.15.4, могут использоваться как самостоятельные устройства, если разработчику нужно организовать связь «точка-точка» или «звезда». Для организации полноценной сети ZigBee необходимо добавить микроконтроллер, в который должен быть загружен набор управляющих программ, так называемый стек протоколов ZigBee, который обеспечивает возможность самоорганизации и самовосстановления сети. Сеть сама определяет оптимальный маршрут передачи данных, а 16-разрядная адресация позволяет находиться в одной сети 65 тысячам устройств. Это бывает необходимым при построении единых сетей на больших промышленных предприятиях. Дальность связи в условиях прямой видимости между двумя устройствами может достигать нескольких километров. Важным также является и тот факт, что данные в ZigBee-сетях могут передаваться по цепочке устройств, своего рода эстафетой, что в сочетании с развитыми средствами самонастройки сильно упрощает развертывание сети на больших площадях. Стандарт также предполагает 128-битное AES-шифрование данных, что позволяет использовать его в различных системах безопасности.

Для работы устройств по стандарту ZigBee выделены три диапазона частот: 868МГц, 915МГц и 2,4ГГц. Первый диапазон используется только в Европе, второй только в Америке и Австралии, а третий является международным и используется, в том числе, в России. Государственная комиссия по радиочастотам (ГКРЧ) РФ приняла в мае 2007 года решение о выделении физическим и юридическим лицам на территории РФ полосы радиочастот 2400-2483,5 МГц для применения устройств малого радиуса действия (ZigBee) с мощностью до 100 мВт. Использование указанных полос может осуществляться без оформления отдельных решений ГКРЧ и разрешений на их использование. Спецификация стандарта приведена в табл. 1.

Рассмотрим характеристики микроконтроллера JN5148 [7]. Это базовый МК, на основе которого изготавливаются готовые модули, различающиеся в основном типом и способом подключения антенны. МК JN5148 является устройством с весьма малым током потребления. Этот высокопроизводительный беспроводной МК ориентирован на работу с сетевыми приложениями ZigBee PRO. В состав МК входит (рис.1) 32-разрядный RISC-процессор с высоким быстродействием, приоритетной обработкой прерываний и программно регулируемой тактовой частотой. Также МК включает в себя 2.4ГГц приемопередатчик по стандарту IEEE802.15.4, 128КБ ПЗУ, 128КБ ОЗУ, широкий выбор интерфейсов для подключения аналоговых и цифровых периферийных устройств. Большой объем памяти позволяет обрабатывать приложение пользователя совместно со стеком ZigBee Pro. Низкий ток потребления (18 мА в активном режиме) позволяет ис-

пользовать обычные литиевые батарейки-таблетки. МК работает как правило в импульсном режиме с большой скважностью, проводя большую часть времени в спящем режиме с током потребления менее 1мкА, поэтому средний ток потребления от батареи оказывается небольшим и тем самым обеспечивается большой сроком службы без замены батареи.

Таблица 1

Спецификация стандарта ZigBee

Стандарт	802.15.4 ZigBee		
Частота	868 МГц	915 МГц	2,4 ГГц
Число каналов/полоса	1/-	10/2 МГц	16/5 МГц
География распространения	Европа	Америка	Весь мир
Макс. скорость и тип модуляции	20 кбит/с, BPSK	40 кбит/с, BPSK	250 кбит/с, O-QPSK
Выходная мощность, ном.	0 dBm (1 мВт)	0 dBm (1 мВт)	0 dBm (1 мВт)
Дальность	10–100м		
Чувствительность (спецификация)	-92dBm	-92dBm	-85dBm
Размер стека	4–32 кбайт		
Срок службы батареи	От 100 до 1000 и более дней		
Размер сети (число узлов)	65536 (16-разрядные адреса), 264 (64-разрядные адреса)		

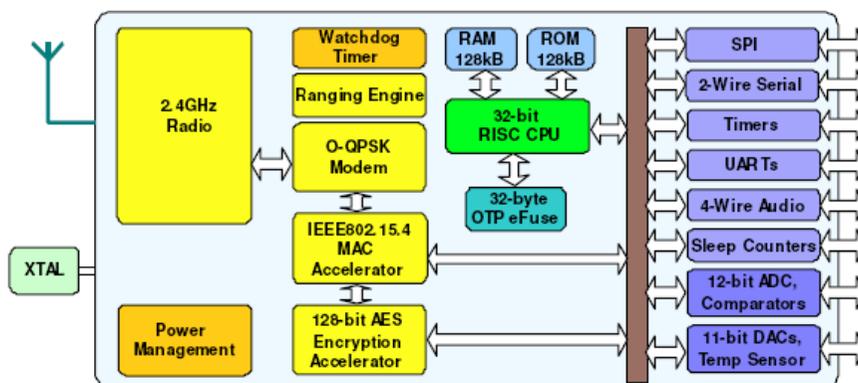


Рис.1. Микроконтроллер JN5148

В приборе имеются счетчики импульсов с низким потреблением, работающие в спящем режиме, которые спроектированы для подсчета импульсов в AMR приложениях. Для подключения к внешним устройствам и для работы со звуком предусмотрен 4-проводной интерфейс I2S. Здесь приводятся основные характеристики приемопередатчика:

- Частота 2.4ГГц, соответствие стандарту IEEE802.15.4

- Имеется система позиционирования, которая по задержкам сигналов от смежных узлов оценивает свое местоположение
- 128-битное шифрование данных AES
- MAC ускоритель с пакетным форматированием, CRC, проверкой адреса и перезапросом при недопустимом количестве ошибок; таймеры
- Возможность передачи данных на скоростях 500 и 667 Кб/с
- Спящий режим для экономного потребления
- Напряжение питания 2.0 - 3.6 В, возможность работы от батареек
- Потребление в спящем режиме 0.12мкА
- Потребление в спящем режиме с включенным таймером 1.25мкА
- Стоимость дополнительных компонентов не превышает \$ 0,50
- Ток потребления при передаче 18мА
- Ток потребления при приеме 15мА
- Чувствительность приемника -95дБм
- Мощность передатчика 2.5дБм

JN5148 требует минимального количества внешних компонентов для беспроводной передачи данных: кристалл, флэш-память, компоненты согласования и антенна – это все, что требуется для устойчивой работы при минимальной стоимости компонентов и с наименьшим размером модуля. Постоянная память ROM реализована на ОЗУ статического типа, которое хранит информацию только при подключенном питании; при первоначальном включении содержимое ROM переписывается из флэш-памяти. Достоинством сетей с такими модулями является то, что их развитие и модернизация не требует аппаратных перестроек и производится перемещением положения узлов на контролируемой территории, добавлением новых элементов и модификацией программного обеспечения.

Первичные преобразователи

Как и в любых информационно-измерительных системах, основой получения информации в сенсорных сетях являются первичные преобразователи (датчики).



Рис.2. Блок-схема встроенных датчиков

В рассмотренных выше блоках датчики являются внешними устройствами, подключаемыми через соответствующие интерфейсы. Однако, в последнее время наметилась тенденция к интеграции чувствительных элементов первичных пре-

образователей непосредственно в модуль управления и приема-передачи, как это показано на рис. 2.

Энергопотребление

Мощность, потребляемая от встроенного источника питания, максимальна при наличии передачи информации. В частности, усилитель мощности должен направить достаточно энергии, чтобы приемная антенна и сам приемник обеспечили требуемое превышение уровня сигнала над уровнем шумов. В типичной беспроводной системе мощность источника питания P_{Bat} определяется потерями на пути распространения сигнала и необходимой мощностью на входе приемной антенны в соответствии со следующей формулой [8]:

$$P_{pr} = P_{Bat} \left(\frac{P_{prd}}{P_{Bat}} \right) \left(\frac{P_{izl}}{P_{prd}} \right) \left(\frac{P_{I,}}{P_{izl}} \right) \left(\frac{P_{pr}}{P_{I,}} \right) = P_{Bat} (\eta_{prd}, \eta_{ant}, \eta_{izl}, \eta_{pra},) \leq P_{u} (C / Ш),$$

где $P_{Bat}, P_{prd}, P_{izl}, P_{I,}$ и P_{pr} – мощности источника питания, усилителя передатчика, излученная мощность антенны передатчика, мощность на приемной антенне и на входе приемника соответственно;

$\eta_{prd}, \eta_{ant}, \eta_{izl}$, и η_{pra} – коэффициенты передачи передатчика, передающей антенны, среды распространения и приемной антенны;

$C/Ш$ – необходимое отношение сигнал/шум;

P_u – мощность шума, приведенная ко входу приемника.

$$P_u = kT\Delta f,$$

где Δf – полоса частот сигнала (предполагается, что шум в полосе частоты сигнала аддитивный и имеет гауссовское распределение).

Коэффициент передачи среды распространения обратно пропорционален квадрату расстояния между антеннами:

$$\eta_{izl,} = \left(\frac{C}{4\pi df_c} \right)^2 (1 - |K|^2),$$

где C – скорость света;

d – расстояние между антеннами;

f_c – несущая частота сигнала;

K – коэффициент отражения антенны.

В результате формула для расчета необходимой мощности источника питания принимает следующий вид:

$$P_{Bat} = \frac{(C / Ш) kT \Delta f}{\eta_{prd}, \eta_{ant}, \eta_{pra}, \left(\frac{C}{4\pi df_c} \right)^2 (1 - |K|^2)}.$$

То есть необходимая мощность прямо пропорциональна полосе пропускания, отношению сигнал/шум и квадратам несущей частоты и расстояния до приемной антенны, и обратно пропорциональна коэффициентам передачи усилителя и обеих антенн - передающей и приемной. Формула указывает на необходимость уменьшения до минимально возможных значений полосы пропускания, несущей частоты и дистанции передачи.

Первой проблемой, встающей перед разработчиком автономных датчиков, является интеграция в микросхему источника питания. Такой ИП должен содержать в малом объеме достаточно энергии, чтобы обеспечить его автономное функционирование в течение нескольких дней, месяцев или даже лет. Тонкопленочные литий-ионные аккумуляторные батареи довольно удобны и имеют приемлемую емкость, однако ее недостаточно для питания реального электронного устройства при приемлемых размерах. Определенный интерес представляет подзарядка или замена аккумуляторных элементов, в трудно доступных местах, с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [9].

Распределенные информационно-управляющие системы

Если в состав сенсорной сети в качестве конечных элементов включить исполнительные устройства, то в ней появятся функции распределенной управляющей системы. Исполнительные устройства работают на основе информации, получаемой из сети и осуществляют воздействие на объект управления, с целью приведения его в требуемое состояние. Если объект управления содержит чувствительные элементы, характеризующие текущее состояние объекта, и указанные чувствительные преобразователи направляют в сеть информацию о реальном состоянии объекта, то возникает эффект «обратной связи», замыкающей контур управления. Специалистам в области управления хорошо известно, что даже небольшие запаздывания в цепи обратной связи, вызывают не только ухудшение качества процесса управления, но могут привести к потере устойчивости всей системы в целом. В распределенных информационно-управляющих системах задержки в цепях обратной связи обусловлены, в основном, сетевыми задержками, которые могут достигать весьма значительных размеров. Сетевые задержки возникают по двум причинам: это задержки в цепях коммутации пакетов и задержки распространения сигналов в среде передачи. Именно поэтому, сети ZigBee, хорошо зарекомендовавшие себя в низкоскоростных системах управления, становятся совершенно непригодны во многих управляющих системах промышленного применения

Уменьшение задержек в цепях коммутации.

Сегодня существует несколько вариантов промышленного Ethernet (Industrial Ethernet), имеющих самые различные протоколы работы. Появление различных модификаций промышленного Ethernet обусловлено тем, что, несмотря на весьма большую пропускную способность сети, обычные протоколы Ethernet, основанные на случайном методе доступа абонентских устройств к ресурсам сети, не дают гарантии передачи информации за определенный, ограниченный промежуток времени. В большинстве случаев протоколы Industrial Ethernet, выбранные для использования в промышленных устройствах, различаются у различных

производителей. Устройства совместимы только с оборудованием того поставщика, который использует данный протокол. Это заставляет клиентов покупать все промышленное оборудование от одного производителя (даже если это не наиболее экономично), или преодолевать значительные проблемы интеграции оборудования от нескольких поставщиков, путем преобразования протоколов с помощью шлюзов.

Ситуация кардинально изменяется с появлением сетей TSN (Time-Sensitive Networking) [10]. Это сети, совместимые с Ethernet, способны передавать чувствительные к задержкам пакеты с минимально возможными задержками. Они совместили в себе все положительные свойства сетей Ethernet с возможностью получения детерминированной задержки сетей TDM, предоставляя абсолютный приоритет более высокоприоритетным пакетам. Основная идея TSN может быть понятна из рис. 3.

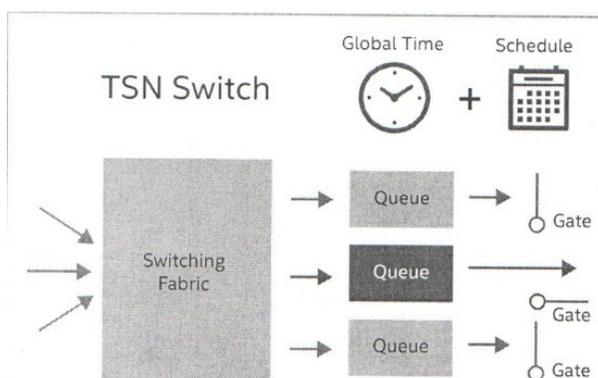


Рис. 3. Коммутация на выходе TSN- коммутатора

На рис. 3 показан выход коммутирующей матрицы, подключенной к одному из выходных портов коммутатора. Образующаяся на выходе порта очередь разделяется на несколько отдельных очередей, в соответствии с приоритетами находящихся в них пакетов. Пакеты из указанных очередей попеременно направляются на выход коммутатора, образуя каждый раз поток пакетов с одноименным приоритетом. Передача каждого из потоков происходит в течение программно управляемого временного окна. Таким образом, коммутирование пакетов внутри одного канала происходит с применением TDMA. Коммутация потоков производится по программно формируемому расписанию, обеспечивающему минимизацию задержек высокоприоритетных потоков. Ряд пакетов, следующих от одного источника к одному общему получателю, могут объединяться в сообщения, при этом, все «окна» по пути следования указанного сообщения должны открываться одновременно, минимизируя время задержки пакетов в коммутаторах.

Ключевой особенностью TSN, обеспечивающей гарантированные сроки доставки сообщений, являются синхронизация времени и планирование трафика. Они отражены в стандартах 802.1AS и 802.1Qbv, соответственно. Все устройства, участвующие в сети TSN синхронизированы с глобальным временем и

«знают» о сетевом расписании, определяющем как расставлены приоритеты и когда сообщения будут пересылаться с каждого коммутатора.

Своевременный выпуск сообщений из коммутатора гарантирует, что задержки в сети удастся предсказать детерминистически. Это позволяет объединить критичный и некритичный ко времени трафик в единой сети.

Для рынка промышленной автоматизации, который много лет боролся с множеством несовместимых протоколов связи, TSN предоставляет ряд преимуществ:

- TSN гарантирует совместимость на сетевом уровне между устройствами от разных производителей. Это дает клиентам гораздо больший выбор устройств для своей системы, избегая привязки к поставщику и обеспечивает связь между различными системами.
- Поскольку TSN является частью семейства стандартов Ethernet, он естественно масштабируется с Ethernet. Это означает, что технология не будет ограничена с точки зрения пропускной способности или других критериев эффективности.
- TSN может использоваться для связи между машинами, а также от машин к корпоративным системам. Связь между критически важными системами можно осуществлять на основе TSN, а существующие, некритичные ко времени системы, могут быть связаны посредством сети Ethernet.

Учет задержек в среде распространения сигналов

Задержки в среде распространения сигналов имеют физическую природу и не могут быть устранены при заданном размере сети. Однако, они создают запаздывание, как в цепях прямого канала, так и в цепях каналов обратной связи, и могут оказать значительное влияние на качество, и даже устойчивость процесса управления. С целью компенсации негативного влияния задержек в среде распространения, а также задержек в цепях коммутации, используют *методы прогнозирования* процессов в системах управления. [2, 11-15]. Прогнозирование осуществляется методами математического моделирования. Различают два вида моделей, применяемых в целях прогнозирования. Это модели, связанные с данной предметной областью, и модели, в виде временных рядов. Модели, в виде временных рядов достаточно просты, не связаны с данной предметной областью и применяются в сенсорных сетях, в основном, для сжатия передаваемых данных. К математическим методам, реализующим подобные модели можно отнести методы экстраполяции тенденций (параболическая экстраполяция, метод подбора функций, метод скользящего окна и другие). Для распределенных информационно-управляющих сетей, которые критичны к весьма малым задержкам, применяются, в основном, модели предметной области. С повышением динамичности управляемости подобных систем, появлением скоростных компьютерных сетей такие модели несомненно получают свое дальнейшее развитие.

В качестве примеров одной из таких систем рассмотрим систему управления роем беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), представленную на рис. 4.

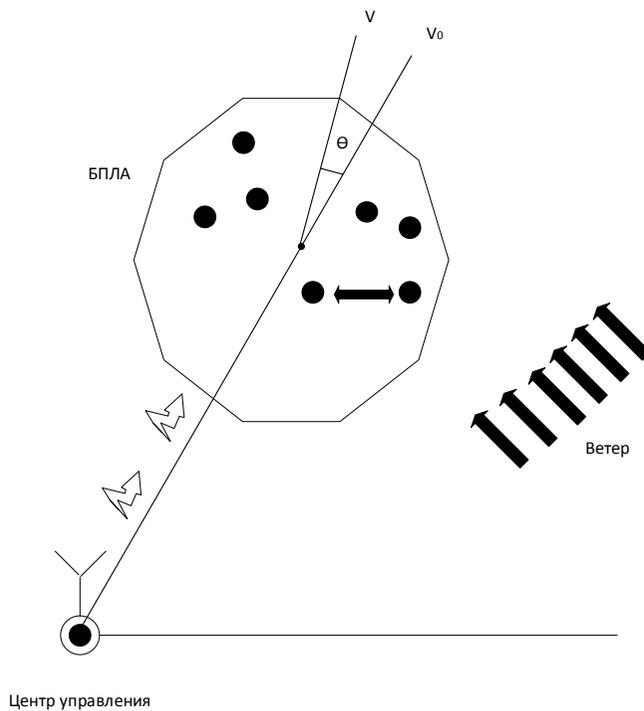


Рис. 4. Управление роем БПЛА

Рой таких БПЛА управляется из общего Центра управления и должен иметь направление и скорость перемещения центра роя, заданные вектором V_0 . Под воздействием ветра и иных внешних факторов перемещение центра роя отклоняется от заданного направления на угол θ и происходит в направлении вектора V . Изучая статистику перемещения центра роя, можно построить экстраполяционную модель вектора этого перемещения и передать каждому БПЛА упреждающий сигнал управления. Однако, для качественного управления необходимо иметь также предметную модель самого БПЛА, как объекта управления. Именно такая модель позволит управлять быстро протекающими процессами и исключить возможность столкновения соседних БПЛА. Следует отметить, что для уменьшения запаздываний управляющих сигналов, контуры автоматического управления, исключающие возможность столкновения БПЛА, целесообразно замыкать непосредственно между самими БПЛА, исключив из них Центр управления.

Рассмотренный пример показывает возможности применения БСС в качестве основы распределенных информационно-управляющих систем.

Заклучение

Беспроводные сенсорные сети получили мировое признание в ведущих организациях по стандартизации. Тщательная проработка физического канального, сетевого и транспортного уровней модели ISO/OSI создали хороший задел для быстрой разработки в внедрения сенсорных сетей во все сферы жизнедеятельности. Повсеместное внедрение сенсорных сетей явилось основой для перехода к

концепции Интернета вещей. Три ключевых параметра: низкое энергопотребление, самоорганизация и безопасность позволяют им и по сей день оставаться незаменимыми для сбора данных различных приложений. Таким образом, БСС, несомненно являясь распределенными информационно-измерительными системами, заложили основу создания распределенных информационно-управляющих систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лихтциндер Б. Я., Киричек Р.В., Голубничая Е. Ю., Федотов Е. Д., Кочуров А. А.* Беспроводные сенсорные сети // Научно-техническое издательство "Горячая линия-Телеком", М: 2020, 236 с. ил.
2. *Тиханычев О. В.* Прогнозирование при управлении динамическими системами. // Программные продукты и системы №1 2017. С. 40=44.
3. ZigBee Alliance. ZigBee Specification. <http://www.ZigBee.org>
4. *Незнамов Ю., Козаченко В.* Перспективы использования беспроводных ZigBee-интерфейсов в электроприводе // Электронные компоненты №11, 2008
5. *Варгаузин В.* Радиосети для сбора данных от сенсоров, мониторинга и управления на основе стандарта IEEE 802.15.4 // Теле Мультимедиа №6, 2005.
6. *Кривченко Т.* Технология ZigBee // Коммунальный комплекс России, №4, 2006.
7. *Еркин А.* Разработка распределенных систем контроля датчиков на основе защищенных низко потребляющих беспроводных ZigBee-сетей на базе микроконтроллеров фирмы Jennic/ Беспроводные устройства CHIP NEWS#1= 2010, с. 1-9.
8. *Ринси-Мора Г., Вогт Дж.* Беспроводные датчики с автономным питанием // Электронные компоненты №11 2007. С51-56.
9. *Лихтциндер Б. Я., Маслов О. Н.* Способ подзарядки аккумуляторов в беспроводной сенсорной сети Патент на изобретение № 2730468 от 24. 08 2020.
10. *Brooks' S. , Uludag E.* Time-Sensitive Networking: From Theory to implementation in Industrial Automation.// White Paper, Intel, WP-01279-1.0, pp 1-7.
11. *Выпускняк В. И., Гуральник А. М., Тиханычев О. В.* Моделирование военных действий – история, состояние, перспективы развития // Военная мысль 214 № 7. С.28-37.
12. *Денисов В. И., Саяпин О. В., Тиханычев О. В.* О месте математического моделирования в органах военного управления // Военная мысль. 2016. №5. С 28-33.
13. *Тиханычев О.В., Саяпин О.В.* Оперативное прогнозирование развития обстановки как основа успешного управления применением войск (сил) // Военная мысль. 2015. № 4. С. 3–7.
14. *Новиков Д.А., Чхартшвили А.Г.* Активный прогноз. М.: Изд-во ИПУ РАН, 2002. 101 с.
15. *Цигичко В.Н.* Модели в системе принятия военно-стратегических решений в СССР. М.: Импернум-Пресс, 2005. 96 с.

Статья поступила в редакцию 10 октября 2020 г.

SENSOR NETWORKS - DISTRIBUTED INFORMATION MEASURING AND INFORMATION CONTROL SYSTEMS

B.Ya. Likhhtsinder

Povolzhskiy state University of Telecommunications and Informatics,
23, L. Tolstoy st., Samara, 443010, Russian Federation

Abstract. *The problems of control and management of geographically distributed objects are considered. The sensor networks operating on the ZigBee technology are considered. The characteristics of the 802.15.4 ZigBee standard are given. The advantages of this technology are shown when building networks that are not very critical to traffic delays. The elements of such a network are considered. The primary converters used in such networks and their energy characteristics are considered. The issues of reducing and compensating delays in control circuits are considered. It is shown that modern wireless sensor networks can be considered as distributed information measuring and information control systems.*

Keywords: *sensor networks, measurement, control, feedback, modeling, sensors, delay.*

REFERENCES

1. *Likhhtzinder B.Ya., Kirichek R.V., Golubnichaya E. Yu., Fedotov E. D., Kochurov A. A.* Wireless sensor networks. // Scientific and technical publishing house "Hot line-Telecom", Moscow: 2020 , 236 p.
2. *Tikhanychev O.V.* Forecasting when controlling dynamic systems. // Software products and systems # 1 2017. pp. 40 - 44.
3. ZigBee Alliance. ZigBee Specification. <http://www.ZigBee.org>
4. *Neznamov Y., Kozachenko V.* Prospects for the use of wireless ZigBee interfaces in an electric drive // Electronic components №11, 2008
5. *Vargauzin V.* Radio networks for data collection from sensors, monitoring and control based on the IEEE 802.15.4 standard // Tele Multimedia №6, 2005.
6. *Krivchenko T.* ZigBee Technology // Communal Complex of Russia, N4, 2006.
7. *Erkin A.* Development of distributed sensor control systems based on secure low-power wireless ZigBee networks based on Jennic microcontrollers / Wireless CHIP NEWS # 1 = 2010, pp. 1-9.
8. *Rinsey-Mora G., Vogt J.* Self-powered wireless sensors. // Electronic components No. 11 2007. pp. 51-56.
9. *Likhhtsinder B. Ya., Maslov O. N.* Method for recharging batteries in a wireless sensor network Patent for invention No. 2730468 dated 24.08.2020.
10. *Brooks' S., Uludag E.* Time-Sensitive Networking: From Theory to implementation in Industrial Automation. // White Paper, Intel, WP-01279-1.0, pp.1-7.
11. *Vypusknyak V.I., Guralnik A.M., Tikhanychev O.V.* Modeling of military operations - history, state, development prospects // Military Thought 214 № 7. pp.28-37.
12. *Denisov V.I., Sayapin O.V., Tikhanychev O.V.* On the place of mathematical modeling in military command and control bodies // Military Thought. 2016. No. 5. From pp.28-33.
13. *Tikhanychev O.V., Sayapin O.V.* Operational forecasting of the development of the situation as the basis for successful control of the use of troops (forces) // Military Thought. 2015. No. 4. P. 3–7.
14. *Novikov D.A., Chkhartishvili A.G.* Active forecast. M.: Publishing house of IPU RAN, 2002.101 p.
15. *Tsigichko V.N.* Models in the system of making military-strategic decisions in the USSR. Moscow: Imperium-Press, 2005.96 p.

Boris Ya. Likhhtsinder (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

УДК 681.391:543/545

ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ АСИММЕТРИИ И ЭКСЦЕССА ХРОМАТОГРАФИЧЕСКИХ ПИКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФУНКЦИЙ ЧЕБЫШЕВА – ЭРМИТА И РЯДОВ ГРАМА – ШАРЛЬЕ**Р.Т. Сайфуллин, А.В. Бочкарев*Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. Цель работы заключается в разработке алгоритма, позволяющего по коэффициентам разложения в базисе функций Чебышева – Эрмита оценить коэффициенты асимметрии и эксцесса для хроматографического пика, заданного рядом Грама – Шарлье. Исследуется возможность прямого перехода от коэффициентов кодирования в базисе функций Чебышева – Эрмита к весам при членах ряда Грама – Шарлье с дальнейшим выражением интересующих коэффициентов асимметрии и эксцесса. С помощью алгоритма кодирования сигналов в базисе функций Чебышева – Эрмита применительно к рядам Грама – Шарлье формируется линейное уравнение относительно коэффициентов асимметрии и эксцесса, система таких уравнений решается методом Крамера для вычисления значений искоемых коэффициентов. Приводятся примеры вычисления искоемых коэффициентов для сигнала, заданного рядом Грама – Шарлье. Производится анализ погрешностей алгоритма, зависимости погрешностей вычисленных коэффициентов асимметрии и эксцесса от погрешностей определения сдвига и среднеквадратической ширины исследуемого хроматографического пика. Благодаря использованию полученных формул расчета коэффициентов асимметрии и эксцесса удастся построить быстрые вычислительные алгоритмы обработки, в том числе решение задачи разделения совмещенных хроматографических пиков. Для вычислений и графического представления результатов моделирования использована система компьютерной алгебры *Wolfram Mathematica 11.3*.

Ключевые слова: функции Чебышева – Эрмита, ряд Грама – Шарлье, асимметрия, эксцесс, хроматографический пик, преобразование сигналов, разделение совмещенных сигналов, хроматография.

Введение

Одним из подходов к созданию алгоритмов обработки сигналов аналитических приборов является кодирование сигнала в базисе функций Чебышева – Эрмита с последующим декодированием по другим, предварительно рассчитанным базисам; причем в зависимости от выбора базиса возможно получить сам сигнал [1–3], его производную различных порядков [3, 4], вейвлет-преобразование [5, 6] и т. п. Функции Чебышева – Эрмита находят широкое распространение в различ-

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта аспирантов ФГБОУ ВО «СамГТУ».

Сайфуллин Раухат Талгатович (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Информационно-измерительная техника».

Бочкарев Андрей Владимирович, аспирант, преподаватель кафедры «Информационно-измерительная техника».

ных областях науки и техники [7–14], а также обладают сглаживающим свойством [14].

Составляющие сигналы аналитических приборов отдельные пики (далее *хроматографические пики*) с высокой степенью точности описываются теми же функциями, что и законы распределения, близкие по форме кривой к гауссиану либо к его асимметричным аналогам [15]. В этой связи для анализа формы хроматографических пиков применяются модели, заимствованные из статистики, в частности связанные с моментами случайной величины [15, 16]. Одной из таких моделей являются ряды Грама – Шарлье и производные от них ряды Эджворта – Крамера, для которых известны результаты исследований, указывающие на связь весов при членах ряда с параметрами процесса хроматографического разделения [17, 18].

В настоящий момент при обработке сигналов аналитических приборов не имеется единого подхода к разделению совмещенных хроматографических пиков, что дополнительно усложняется наличием асимметрии [19], в связи с чем актуальным является вопрос разработки новых вычислительных алгоритмов, направленных на решение данной задачи. В рамках данной работы рассматривается возможность вычисления параметров формы отдельных асимметричных хроматографических пиков, закодированных в базисе функций Чебышева – Эрмита, с применением рядов Грама – Шарлье. Результаты работы направлены на дальнейшее применение при разделении совмещенных асимметричных хроматографических пиков.

1. Ряды Грама – Шарлье и их связь с функциями Чебышева – Эрмита

Из [15] известно, что любой асимметричный хроматографический пик можно представить в виде разложения в следующий ряд, названный рядом Грама – Шарлье типа А:

$$F(x) = A \cdot f\left(\frac{x - \mu_0}{\sigma}\right) + \sum_{v=3}^V a_v \cdot \frac{\partial^v f\left(\frac{x - \mu_0}{\sigma}\right)}{\partial \left(\frac{x - \mu_0}{\sigma}\right)^v}, \quad (1)$$

где A – амплитуда пика;

σ – среднеквадратическая ширина пика;

V – число используемых элементов ряда, в общем случае равно ∞ ;

$f\left(\frac{x - \mu_0}{\sigma}\right) = e^{-\frac{(x - \mu_0)^2}{2\sigma^2}}$ – выражение для симметричного аналитического пика;

a_v – функции моментов v порядка, в частности [15]:

$$a_3 = -\gamma_1 = -\frac{\mu_3}{\sigma^3}, \quad a_4 = \gamma_2 = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3,$$

где μ_3, μ_4 – моменты третьего и четвертого порядка соответственно.

Величины γ_3 и γ_4 названы соответственно коэффициентами асимметрии (скошенности, skew) и эксцесса (островершинности, excess) и имеют соответствующий названию геометрический смысл, что делает их значимыми с точки зрения обработки сигналов аналитических приборов, в частности при решении

некорректно поставленной задачи разделения совмещенных хроматографических пиков [15].

Известно выражение для полиномов Эрмита [20]:

$$He_v(x) = (-1)^v e^{\frac{x^2}{2}} \cdot \frac{d^v e^{-\frac{x^2}{2}}}{dx^v},$$

что при замене $\frac{x - \mu_0}{\sigma} = x$ дает

$$He_v\left(\frac{x - \mu_0}{\sigma}\right) = (-1)^v e^{\frac{(x - \mu_0)^2}{2\sigma^2}} \cdot \frac{d^v e^{-\frac{(x - \mu_0)^2}{2\sigma^2}}}{d\left(\frac{x - \mu_0}{\sigma}\right)^v}. \quad (2)$$

Выражая из (2) $\frac{\partial^v f\left(\frac{x - \mu_0}{\sigma}\right)}{\partial\left(\frac{x - \mu_0}{\sigma}\right)^v}$, получим:

$$\frac{\partial^v f\left(\frac{x - \mu_0}{\sigma}\right)}{\partial\left(\frac{x - \mu_0}{\sigma}\right)^v} = (-1)^v f\left(\frac{x - \mu_0}{\sigma}\right) He_v\left(\frac{x - \mu_0}{\sigma}\right). \quad (3)$$

Выполняя замену (3) в (1), получаем следующее представление ряда (1):

$$F(x) = A \cdot f\left(\frac{x - \mu_0}{\sigma}\right) \left[1 + \sum_{v=3}^V \frac{a_v (-1)^v}{v!} \cdot He_v\left(\frac{x - \mu_0}{\sigma}\right) \right]. \quad (4)$$

Поскольку для обработки сигналов аналитических приборов интерес представляют коэффициенты при членах ряда 3-го и 4-го порядка, вычислим (4) при $V=4$ с заменой согласно указанным выше соотношениям, $\gamma_1 = -a_3$ и $\gamma_2 = a_4$:

$$F(x) = A \cdot f\left(\frac{x - \mu_0}{\sigma}\right) \left[1 + \frac{\gamma_1}{6} He_3\left(\frac{x - \mu_0}{\sigma}\right) + \frac{\gamma_2}{24} He_4\left(\frac{x - \mu_0}{\sigma}\right) \right]. \quad (5)$$

При разложении произвольного сигнала $s(x)$ в базисе функций Чебышева – Эрмита [20] его можно представить в следующем виде [13, 3]:

$$s(x) = \sum_{n=3}^N c_n \cdot \varphi_n(x),$$

причем $s(x)$ можно представить в виде

$$s(x) = \sum_{n=3}^N \frac{c_n}{\alpha_n} \cdot H_n(x) \cdot e^{-\frac{x^2}{2}}, \quad (6)$$

поскольку

$$\varphi_n(x) = \frac{1}{\alpha_n} \cdot H_n(x) \cdot e^{-\frac{x^2}{2}}, \quad \alpha_n = \sqrt{2^n n! \sqrt{\pi}}, \quad (7)$$

где $H_n(x)$ – полином Эрмита отличного от $He_n(x)$ типа, заданный выражением [20]:

$$H_n(x) = (-1)^n e^{x^2} \cdot \frac{d^n e^{-x^2}}{dx^n}.$$

Ограничившись по аналогии с (5) порядком $N=4$ суммы (6), получим:

$$s(x) = e^{-\frac{x^2}{2}} \left[\frac{c_0}{\alpha_0} \cdot H_0(x) + \frac{c_1}{\alpha_1} \cdot H_1(x) + \frac{c_2}{\alpha_2} \cdot H_2(x) + \frac{c_3}{\alpha_3} \cdot H_3(x) + \frac{c_4}{\alpha_4} \cdot H_4(x) \right],$$

или, с учетом $H_0(x)=1$:

$$s(x) = e^{-\frac{x^2}{2}} \left[\frac{c_0}{\alpha_0} + \frac{c_1}{\alpha_1} \cdot H_1(x) + \frac{c_2}{\alpha_2} \cdot H_2(x) + \frac{c_3}{\alpha_3} \cdot H_3(x) + \frac{c_4}{\alpha_4} \cdot H_4(x) \right]. \quad (8)$$

Можно видеть, что выражения (5) и (8) не только задают один и тот же сигнал $s(x)=F(x)$, но и близки по структуре: множитель за скобками – гауссиан, в скобках – сумма полиномов Эрмита различных порядков с некоторыми весами. Если структурное сходство указывает на возможность перехода через некоторую функцию $\chi(x, \mu_0, \sigma)$ от i -го члена ряда Грама – Шарлье для некоторого сигнала к i -му члену разложения того же сигнала по функциям Чебышева – Эрмита, то коэффициенты при членах ряда Грама – Шарлье могут быть выражены через c_n , что позволяет при кодировании сигналов в базисе функций Чебышева – Эрмита одновременно вычислять параметры γ_1 и γ_2 . Из-за того, что данные коэффициенты представляют интерес при обработке сигналов аналитических приборов, ниже проверим возможность формирования такой функции $\chi(x, \mu_0, \sigma)$.

2. Исследование возможности формирования функции для перехода от коэффициентам разложения в базисе функций Чебышева – Эрмита к коэффициентам разложения в ряд Грама – Шарлье

Одним из отличий между (5) и (8) является использование полиномов Эрмита различных типов. Между двумя типами полиномов известна зависимость:

$$He_n(x) = \frac{1}{\sqrt{2^n}} H_n\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right). \quad (9)$$

Подставляя (9) в (5), получим:

$$F(x) = A \cdot f\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right) \left[1 + \frac{\gamma_1}{12\sqrt{2}} H_3\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right) + \frac{\gamma_2}{96} H_4\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right]. \quad (10)$$

С учетом того, что $H_0\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)=1$, получим следующий вид (10):

$$F(x) = A \cdot f\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right) \left[H_0\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right) + \frac{\gamma_1}{12\sqrt{2}} H_3\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right) + \frac{\gamma_2}{96} H_4\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right]. \quad (11)$$

Поскольку у полиномов в скобках в качестве аргумента используется $\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}$, выразим $f\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right)$ через $f\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)$:

$$f\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right) = f^2\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right). \quad (12)$$

Также нельзя не заметить схожесть $f\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)$ и $\varphi_n(x)$, поскольку $f\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)$ можно выразить через $\varphi_n\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)$:

$$f\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right) = \alpha_n \frac{\varphi_n\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)}{H_n\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)}. \quad (13)$$

Подставляя (13) в (12), получим:

$$f\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right) = \alpha_n^2 \frac{\varphi_n^2\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)}{H_n^2\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)}. \quad (14)$$

Подставляем (14) в (11) и вносим $\frac{\varphi_n\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)}{H_n\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)}$ в скобки:

$$F(x) = A\alpha_n^2 \frac{\varphi_n\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)}{H_n\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)} \left[\frac{\varphi_n\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right) H_0\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)}{H_n\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)} + \right. \\ \left. + \frac{\gamma_1}{12\sqrt{2}} \frac{\varphi_n\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right) H_3\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)}{H_n\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)} + \frac{\gamma_2}{96} \frac{\varphi_n\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right) H_4\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)}{H_n\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)} \right]. \quad (15)$$

Поскольку в (15) соотношение $\frac{\varphi_n\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)}{H_n\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)}$ справедливо при любых n , для

находящихся в скобках дробей берем n , соответствующее степени полинома-множителя:

$$F(x) = A\alpha_n^2 \frac{\varphi_n\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)}{H_n\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)} \left[\varphi_0\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right) + \frac{\gamma_1}{12\sqrt{2}} \varphi_3\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right) + \frac{\gamma_2}{96} \varphi_4\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right]. \quad (16)$$

Выполняем обратную подстановку согласно (13)

$$F(x) = Af\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right) \left[\varphi_0\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right) + \frac{\gamma_1}{12\sqrt{2}} \varphi_3\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right) + \frac{\gamma_2}{96} \varphi_4\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right]$$

и переносим $f\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)$ в левую часть выражения, раскрывая скобки:

$$\frac{F(x)}{f\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)} = A\varphi_0\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right) + \frac{A\gamma_1}{12\sqrt{2}} \varphi_3\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right) + \frac{A\gamma_2}{96} \varphi_4\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right). \quad (17)$$

Выражение (17) совпадает по форме с (6), коэффициенты при каждой базисной функции можно интерпретировать как c_n соответствующей степени при разложении сигнала $\frac{F(x)}{f\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)}$ в базисе функций Чебышева – Эрмита, и дальней-

шие преобразования не позволяют представить разложение самого сигнала $F(x)$.

Иначе заменить $He_n(x)$ на $H_n(x)$ можно с помощью разности:

$$He_3\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right) = \frac{H_3\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right)}{4} - \left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right)^3,$$

$$He_4\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right) = \frac{H_4\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right)}{4} - 3\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right)^4 + 6\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right)^2,$$

что при подстановке в (5) с учетом (13) (при $\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma} \rightarrow \frac{x-\mu_0}{\sigma}$) дает:

$$F(x) = A\alpha_n \cdot \frac{\varphi_n\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right)}{H_n\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right)} \left[1 + \frac{\gamma_1}{24} H_3\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right) + \frac{\gamma_2}{96} H_4\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right) + \left(-\frac{\gamma_1}{6} \left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right)^3 - \frac{\gamma_2}{8} \left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right)^4 + \frac{\gamma_2}{4} \left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right)^2 \right) \right]. \quad (18)$$

Раскрывая скобки в (18) и подставляя для каждой дроби $\frac{\varphi_n\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)}{H_n\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)}$ значе-

ние n , соответствующее степени полинома-множителя, где он присутствует, получим выражение

$$F(x) = A\alpha_n\varphi_0\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right) + A\alpha_n\frac{\gamma_1}{24}\varphi_3\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right) + A\alpha_n\frac{\gamma_2}{96}\varphi_4\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right) + \\ + A\alpha_n\frac{\varphi_n\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right)}{H_n\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right)}\left(-\frac{\gamma_1}{6}\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right)^3 - \frac{\gamma_2}{8}\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right)^4 + \frac{\gamma_2}{4}\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right)^2\right),$$

в котором выполняем обратную подстановку согласно (13) и переносим последнее слагаемое из правой части выражения в левую:

$$F(x) - Af\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)\left(-\frac{\gamma_1}{6}\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right)^3 - \frac{\gamma_2}{8}\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right)^4 + \frac{\gamma_2}{4}\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right)^2\right) = \\ = A\alpha_n\varphi_0\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right) + A\alpha_n\frac{\gamma_1}{24}\varphi_3\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right) + A\alpha_n\frac{\gamma_2}{96}\varphi_4\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right). \quad (19)$$

Выражение (19) совпадает по форме с (6), коэффициенты при каждой базисной функции можно интерпретировать как c_n соответствующей степени при разложении в базисе функций Чебышева – Эрмита сигнала

$F(x) - Af\left(\frac{x-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)\left(-\frac{\gamma_1}{6}\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right)^3 - \frac{\gamma_2}{8}\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right)^4 + \frac{\gamma_2}{4}\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right)^2\right)$, и дальнейшие

преобразования не позволяют представить разложение самого сигнала $F(x)$. Таким образом, можно заключить, что сигнал, заданный в виде ряда Грама – Шарлье, не может быть представлен как разложение того же сигнала в базисе функций Чебышева – Эрмита. Рассмотрим далее иной подход для вычисления коэффициентов γ_1 и γ_2 при кодировании сигнала в данном базисе.

3. Разложение заданного рядом Грама – Шарлье сигнала по функциям Чебышева – Эрмита

Для вычисления коэффициентов асимметрии и эксцесса на основе разложения сигнала в базисе функций Чебышева – Эрмита можно подставить ряд Грама – Шарлье в качестве кодируемого сигнала в выражение для расчета c_n :

$$c_n = \int_{-\infty}^{\infty} F(x)\varphi_n(x)dx. \quad (20)$$

При этом следует учесть два обстоятельства:

1) между сигналом и n -й базисной функцией может существовать сдвиг x_0 [6];

2) при кодировании сами базисные функции могут быть подвергнуты масштабированию на величину γ [3].

С учетом описанных переменных (20) примет вид

$$c_n = \frac{1}{\gamma} \int_{-\infty}^{\infty} F(x) \varphi_n \left(\frac{x-x_0}{\gamma} \right) dx. \quad (21)$$

Подставим (5) и (8) в (21):

$$c_n = \frac{A}{\alpha_n \gamma} \int_{-\infty}^{\infty} f \left(\frac{x-\mu_0}{\sigma} \right) \left[1 + \frac{\gamma_1}{6} He_3 \left(\frac{x-\mu_0}{\sigma} \right) + \frac{\gamma_2}{24} He_4 \left(\frac{x-\mu_0}{\sigma} \right) \right] H_n \left(\frac{x-x_0}{\gamma} \right) \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-x_0}{\gamma} \right)^2} dx,$$

а также $f \left(\frac{x-\mu_0}{\sigma} \right) = e^{-\frac{(x-\mu_0)^2}{2\sigma^2}}$:

$$c_n = \frac{A}{\alpha_n \gamma} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{(x-\mu_0)^2}{2\sigma^2} - \frac{1}{2} \left(\frac{x-x_0}{\gamma} \right)^2} H_n \left(\frac{x-x_0}{\gamma} \right) \times \left[1 + \frac{\gamma_1}{6} He_3 \left(\frac{x-\mu_0}{\sigma} \right) + \frac{\gamma_2}{24} He_4 \left(\frac{x-\mu_0}{\sigma} \right) \right] dx. \quad (22)$$

Выделив в степени экспоненты полный квадрат $\left(x - \frac{\gamma^2 \mu_0}{\gamma^2 + \sigma^2} \right)^2$

$$-\frac{(x-\mu_0)^2}{2\sigma^2} - \frac{x^2}{2\gamma^2} = -\frac{\gamma^2 + \sigma^2}{2\gamma^2 \sigma^2} \left[\left(x - \frac{\gamma^2 \mu_0}{\gamma^2 + \sigma^2} \right)^2 + \frac{\gamma^2 \mu_0^2 \sigma^2}{(\gamma^2 + \sigma^2)^2} \right]$$

и введя переменные

$$r = \sqrt{\gamma^2 + \sigma^2}, \quad t = x - \frac{\gamma^2 \mu_0 + x_0 \sigma^2}{r^2} \rightarrow x = t + \frac{\gamma^2 \mu_0 + x_0 \sigma^2}{r^2}, \quad (23)$$

получим

$$-\frac{(x-\mu_0)^2}{2\sigma^2} - \frac{(x-x_0)^2}{2\gamma^2} = -\frac{r^2}{2\gamma^2 \sigma^2} t^2 - \frac{(x_0 - \mu_0)^2}{2r^2}. \quad (24)$$

Подставив (24) в (22), получим:

$$c_n = \frac{A e^{-\frac{(x_0 - \mu_0)^2}{2r^2}}}{\alpha_n \gamma} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-t^2 \left(\frac{r}{\sqrt{2}\gamma\sigma} \right)^2} H_n \left(\frac{x-x_0}{\gamma} \right) \times \left[1 + \frac{\gamma_1}{6} He_3 \left(\frac{x-\mu_0}{\sigma} \right) + \frac{\gamma_2}{24} He_4 \left(\frac{x-\mu_0}{\sigma} \right) \right] dx. \quad (25)$$

Поскольку была выполнена замена (23), следует перейти от x к t во всех частях выражения, для чего выполним замены:

$$p = \frac{x_0 - \mu_0}{r^2}, \quad \frac{x - x_0}{\gamma} = \frac{1}{\gamma}(t - \gamma^2 p), \quad \frac{x - \mu_0}{\sigma} = \frac{1}{\sigma}(t + \sigma^2 p),$$

с учетом которых получим следующий вид (25):

$$c_n = \frac{Ae^{-\frac{(x_0 - \mu_0)^2}{2r^2}}}{\alpha_n \gamma} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-t^2 \left(\frac{r}{\sqrt{2}\gamma\sigma}\right)^2} H_n \left[\frac{1}{\gamma}(t - \gamma^2 p) \right] \times \\ \times \left\{ 1 + \frac{\gamma_1}{6} He_3 \left[\frac{1}{\sigma}(t + \sigma^2 p) \right] + \frac{\gamma_2}{24} He_4 \left[\frac{1}{\sigma}(t + \sigma^2 p) \right] \right\} dx. \quad (26)$$

Рассмотрим выражение для полинома Эрмита $H_n \left[\frac{1}{\gamma}(t - \gamma^2 p) \right]$, который в явном виде может быть задан следующим образом:

$$H_n \left[\frac{1}{\gamma}(t - \gamma^2 p) \right] = n! \sum_{k=0}^{n/2} \lambda_k^n \left(\frac{2}{\gamma} \right)^{n-2k} (t - \gamma^2 p)^{n-2k}, \quad (27)$$

где $\lambda_k^n = \frac{(-1)^k}{k!(n-2k)!}$.

Очевидно, что $(t - \gamma^2 p)^{n-2k}$ – бином Ньютона степени $n-2k$, который можно представить в виде

$$(t - \gamma^2 p)^{n-2k} = \sum_{i=0}^{n-2k} C_{n-2k}^i (-1)^i t^{n-2k-i} \cdot (\gamma^2 p)^i, \quad (28)$$

где $(-1)^i$ характеризует тот факт, что основание бинома представлено разностью;

$$C_{n-2k}^i = \frac{(n-2k)!}{i!(n-2k-i)!}$$

Подставив (28) в (27), получим:

$$H_n \left[\frac{1}{\gamma}(t - \gamma^2 p) \right] = n! \sum_{k=0}^{n/2} \lambda_k^n \left(\frac{2}{\gamma} \right)^{n-2k} \sum_{i=0}^{n-2k} C_{n-2k}^i (-1)^i t^{n-2k-i} \cdot (\gamma^2 p)^i. \quad (29)$$

В свою очередь, полином $He_3 \left[\frac{1}{\sigma}(t + \sigma^2 p) \right]$ в явном виде может быть представлен следующим образом:

$$He_m \left[\frac{1}{\sigma}(t + \sigma^2 p) \right] = m! \sum_{j=0}^{m/2} \lambda_j^m \frac{(t + \sigma^2 p)^{m-2j}}{2^j \sigma^{m-2j}}. \quad (30)$$

Очевидно, что $(t + \sigma^2 p)^{m-2j}$ – бином Ньютона степени $m-2j$, который можно представить в виде

$$(t + r)^{m-2j} = \sum_{l=0}^{m-2j} C_{m-2j}^l \cdot t^{m-2j-l} \cdot (\sigma^2 p)^l. \quad (31)$$

Подставив (31) в (30), получим:

$$He_m \left[\frac{1}{\sigma} (t + \sigma^2 p) \right] = m! \sum_{j=0}^{m/2} \lambda_j^m \frac{1}{2^j \sigma^{m-2j}} \sum_{l=0}^{m-2j} C_{m-2j}^l \cdot t^{m-2j-l} \cdot (\sigma^2 p)^l. \quad (32)$$

Согласно (29) и (32) можно представить произведение $H_{m,n}^*(t) = H_n \left[\frac{1}{\gamma} (t - \gamma^2 p) \right] He_m \left[\frac{1}{\sigma} (t + \sigma^2 p) \right]$, внося под знак суммы выражение для $He_m \left[\frac{1}{\sigma} (t + \sigma^2 p) \right]$ за счет дистрибутивности суммы:

$$H_{m,n}^*(t) = n! m! \sum_{k=0}^{n/2} \left\langle \lambda_k^n \left(\frac{2}{\gamma} \right)^{n-2k} \sum_{i=0}^{n-2k} \left\{ C_{n-2k}^i (-1)^i t^{n-2k-i} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times (\gamma^2 p)^i \sum_{j=0}^{m/2} \left[\lambda_j^m \frac{1}{2^j \sigma^{m-2j}} \left(\sum_{l=0}^{m-2j} C_{m-2j}^l \cdot t^{m-2j-l} \cdot (\sigma^2 p)^l \right) \right] \right\} \right\rangle,$$

где, в свою очередь, под знак внутренней суммы вносим все множители, окончательно приводя подобные члены:

$$H_{m,n}^*(t) = n! m! \sum_{k=0}^{n/2} \left\langle \sum_{i=0}^{n-2k} \left\{ \sum_{j=0}^{m/2} \left[\sum_{l=0}^{m-2j} \left(\lambda_k^n \cdot \lambda_j^m \cdot C_{n-2k}^i \cdot (-1)^i \cdot C_{m-2j}^l \times \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \times \gamma^{2(i+k)-n} \cdot \sigma^{2(l+j)-m} \cdot t^{m+n-2(j+k)-l-i} \cdot p^{l+i} \cdot 2^{n-2k-j} \right) \right] \right\} \right\rangle. \quad (33)$$

Представление (33) выгодно потому, что известен интеграл [21]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} t^n \cdot e^{-t^2 q} dt = \begin{cases} \frac{(n-1)!!}{\sqrt{2^n q^n}} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{q}}, & n \bmod 2 = 0, \\ 0, & n \bmod 2 = 1, \end{cases}$$

который применим к (26) с учетом (33).

При известном $q = \left(\frac{r}{\sqrt{2}\gamma\sigma} \right)^2$ данное выражение примет вид:

$$\int_{-\infty}^{\infty} t^n \cdot e^{-t^2 \left(\frac{r}{\sqrt{2}\gamma\sigma} \right)^2} dt = \begin{cases} \sqrt{2\pi} \left(\frac{\gamma\sigma}{r} \right)^{n+1} (n-1)!!, & n \bmod 2 = 0, \\ 0, & n \bmod 2 = 1. \end{cases} \quad (34)$$

Введем следующее обозначение:

$$I_n = \int_{-\infty}^{\infty} t^n \cdot e^{-\frac{t^2 x_0}{2\gamma^2 r}} dt, \quad \text{или} \quad I_n = \begin{cases} \sqrt{2\pi} \left(\frac{\gamma\sigma}{r} \right)^{n+1} (n-1)!!, & n \bmod 2 = 0, \\ 0, & n \bmod 2 = 1, \end{cases}$$

а также соответствующее ему

$$H_{m,n}^*(I) \stackrel{def}{=} H_{m,n}^*(t), \quad (35)$$

при замене $I_n = t^n$.

Стоит отметить, что при $\mu_0 = 0$ и $x_0 = 0$ множитель p^{l+i} может принимать вид неопределенного выражения 0^0 . Так как в этом случае $(t - \gamma^2 p) = t$ и $(t + \sigma^2 p) = t$, раскрывать степень суммы в полиномах Эрмита через бином Ньютона не требуется, то есть произведение полиномов примет вид

$$H_{m,n}^*(t) = H_n\left(\frac{t}{\gamma}\right) He_m\left(\frac{t}{\sigma}\right) = n!m! \sum_{k=0}^{n/2} \left[\sum_{j=0}^{m/2} \left(\lambda_j^m \cdot \lambda_k^n \cdot 2^{n-2k-j} \frac{t^{m+n-2(j+k)}}{\sigma^{m-2j} \gamma^{n-2k}} \right) \right]. \quad (36)$$

Следовательно, при $\mu_0 = 0$ и $x_0 = 0$ для вычисления $H_{m,n}^*(t)$ следует использовать выражение (36), в противном случае – (33).

После интегрирования (26) можно записать следующим образом:

$$c_n = \frac{Ae^{-\frac{(x_0 - \mu_0)^2}{2r^2}}}{\alpha_n \gamma} \left(H_{0,n}^*(I) + \frac{\gamma_1}{6} H_{3,n}^*(I) + \frac{\gamma_2}{24} H_{4,n}^*(I) \right). \quad (37)$$

Путем простых преобразований представим (37) следующим образом:

$$-c_n \alpha_n \gamma e^{-\frac{(x_0 - \mu_0)^2}{2r^2}} A^{-1} + \frac{H_{3,n}^*(I)}{6} \gamma_1 + \frac{H_{4,n}^*(I)}{24} \gamma_2 = -H_{0,n}^*(I). \quad (38)$$

Выражение (38) представляет собой линейное уравнение относительно неизвестных коэффициентов A^{-1} (обратно пропорционален амплитуде), γ_1 (асимметрия) и γ_2 (эксцесс). Для нахождения коэффициентов составим систему из трех уравнений (число уравнений совпадает с числом неизвестных) при различных n . Для простоты примем наименьшие порядки $n=0, 1, 2$:

$$\begin{cases} -c_0 \alpha_0 \gamma e^{-\frac{(x_0 - \mu_0)^2}{2r^2}} A^{-1} + \frac{H_{3,0}^*(I)}{6} \gamma_1 + \frac{H_{4,0}^*(I)}{24} \gamma_2 = -H_{0,0}^*(I). \\ -c_1 \alpha_1 \gamma e^{-\frac{(x_0 - \mu_0)^2}{2r^2}} A^{-1} + \frac{H_{3,1}^*(I)}{6} \gamma_1 + \frac{H_{4,1}^*(I)}{24} \gamma_2 = -H_{0,1}^*(I). \\ -c_2 \alpha_2 \gamma e^{-\frac{(x_0 - \mu_0)^2}{2r^2}} A^{-1} + \frac{H_{3,2}^*(I)}{6} \gamma_1 + \frac{H_{4,2}^*(I)}{24} \gamma_2 = -H_{0,2}^*(I). \end{cases} \quad (39)$$

Для нахождения A , γ_1 и γ_2 воспользуемся методом Крамера. Составим из системы (39) матрицы вида:

$$a = \begin{pmatrix} -c_0 \alpha_0 \gamma e^{-\frac{(x_0 - \mu_0)^2}{2r^2}} & \frac{H_{3,0}^*(I)}{6} & \frac{H_{4,0}^*(I)}{24} \\ -c_1 \alpha_1 \gamma e^{-\frac{(x_0 - \mu_0)^2}{2r^2}} & \frac{H_{3,1}^*(I)}{6} & \frac{H_{4,1}^*(I)}{24} \\ -c_2 \alpha_2 \gamma e^{-\frac{(x_0 - \mu_0)^2}{2r^2}} & \frac{H_{3,2}^*(I)}{6} & \frac{H_{4,2}^*(I)}{24} \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} -H_{0,0}^*(I) \\ -H_{0,1}^*(I) \\ -H_{0,2}^*(I) \end{pmatrix}.$$

Подставив вектор b в качестве первого столбца a , получим матрицу dA^{-1} , в качестве второго – матрицу $d\gamma_1$, в качестве третьего – матрицу $d\gamma_2$. Тогда, согласно методу Крамера, искомые параметры могут быть найдены по следующим выражениям:

$$A = \frac{|a|}{|dA^{-1}|}, \quad \gamma_1 = \frac{|d\gamma_1|}{|a|}, \quad \gamma_2 = \frac{|d\gamma_2|}{|a|}, \quad (40)$$

где $|\cdot|$ – определитель матрицы.

Очевидно, что полученный алгоритм подразумевает наличие сведений о параметрах γ , σ и μ_0 , и если γ задаются при кодировании сигнала в базисе функций Чебышева – Эрмита, то σ и μ_0 необходимо предварительно определить, поскольку два этих параметра не могут быть выражены в (38) в виде линейной зависимости.

4. Вычисление коэффициентов асимметрии и эксцесса для тестового сигнала по сформированному алгоритму

Вычислим коэффициенты асимметрии и эксцесса для сигнала, заданного выражением (5), в котором в качестве примера зададим следующие значения параметров: $A=1,75$, $\sigma=1,15$, $\mu_0=-0,85$, $\gamma_1=0,65$, $\gamma_2=-0,35$. Вид полученного сигнала представлен на рис. 1.

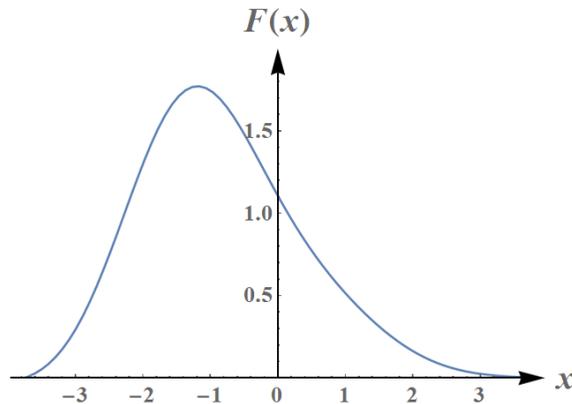


Рис. 1. Тестовый сигнал

Применив полученные в предыдущем разделе выражения (4), получим следующие оценки искомых коэффициентов: $\tilde{\gamma}_+ = 9$, $\tilde{\gamma}_- = 418$, $\tilde{\gamma}_0 = 392$. Относительная погрешность данных оценок составляет, соответственно, $\delta_A = 0,005\%$, $\delta_{\gamma_1} = 0,643\%$, $\delta_{\gamma_2} = 0,094\%$.

На практике параметры σ и μ_0 оцениваются приближенно, из-за чего найденные значения обладают некоторыми погрешностями δ_σ и δ_{μ_0} соответственно. Как следствие, важно иметь представление о зависимости δ_A , δ_{γ_1} , δ_{γ_2} от δ_σ и δ_{μ_0} . Рассмотрим данные зависимости по отдельности для δ_{μ_0} и δ_σ в диапазонах $\delta_{\mu_0} = -2\dots 2\%$ и $\delta_\sigma = -2\dots 2\%$ (рис. 2).

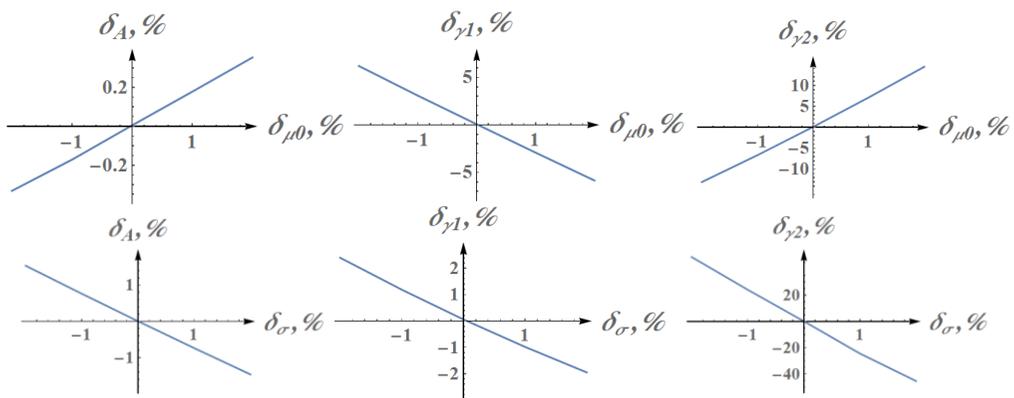


Рис. 2. Зависимости погрешностей вычисления коэффициентов

Максимальные значения погрешностей δ_A , δ_{γ_1} , δ_{γ_2} по модулю в зависимости от δ_σ достигаются при $\delta_\sigma = -2\%$ и составляют $\delta_A = 1,54\%$, $\delta_{\gamma_1} = 2,41\%$, $\delta_{\gamma_2} = 49\%$; в зависимости от δ_{μ_0} достигаются при $\delta_{\mu_0} = 2\%$ для $\delta_A = 0,35\%$ и $\delta_{\gamma_2} = 14,5\%$, и при $\delta_{\mu_0} = -2\%$ для $\delta_{\gamma_1} = 6,2\%$.

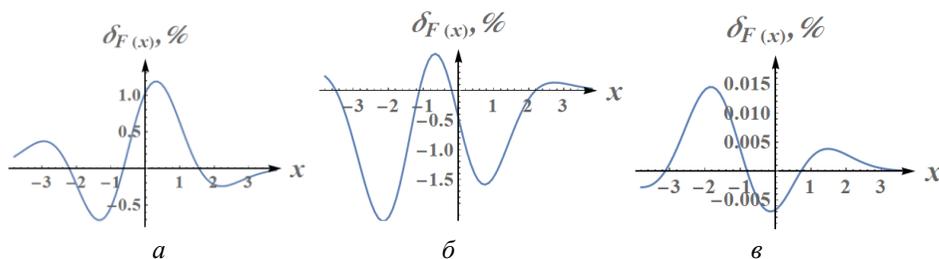


Рис. 3. Зависимости погрешностей формы оценки сигнала:

a – при $\delta_{\mu_0} = 2\%$, b – при $\delta_\sigma = 2\%$, v – при $\delta_\sigma = \delta_{\mu_0} = 0$

Рассмотрим, как δ_σ и δ_{μ_0} влияют на отклонение формы полученного по оценкам $\tilde{f}_1, \tilde{f}_2, \tilde{f}_3$ сигнала \tilde{f} , от формы исходного сигнала $F(x)$. Для этого использовать в качестве меры отклонения относительную погрешность не следует, поскольку сигнал $F(x)$ в окрестностях границ имеет близкие к нулю значения, вследствие чего относительная погрешность будет принимать большие значения даже при малых разностях исходного сигнала и его оценки. Воспользуемся следующим выражением приведенной погрешности в качестве меры точности:

$$\delta_{F(x)} = \frac{\tilde{f} - F(x)}{\max[F(x)]} \cdot 100\%,$$

где $\max[F(x)]$ – максимальное значение сигнала.

На рис. 3 отражены графики данной погрешности для максимальных δ_σ и δ_{μ_0} и при $\delta_\sigma = \delta_{\mu_0} = 0$.

Несмотря на большие погрешности $\delta_A, \delta_{\gamma_1}, \delta_{\gamma_2}$ при тех же δ_σ и δ_{μ_0} форма оценки сигнала меняется слабо, на графике сигнал практически совпадает со своей оценкой. Визуально заметное несовпадение графиков сигнала и его оценки начинается приблизительно при $\delta_\sigma = \delta_{\mu_0} = 5\%$ (рис. 4).

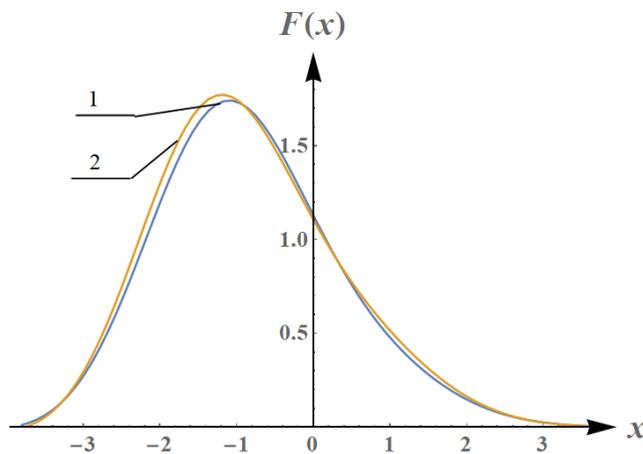


Рис. 4. Оценка сигнала при $\delta_\sigma = \delta_{\mu_0} = 5\%$:

1 – \tilde{f} , 2 – $F(x)$

Выводы

Благодаря использованию полученных выражений для расчета коэффициентов асимметрии и эксцесса в базисе функций Чебышева – Эрмита удастся построить быстрые вычислительные алгоритмы обработки выходных сигналов аналитических приборов, в частности при решении задачи разделения совмещенных хроматографических пиков. Для этого можно построить систему из $3K$ линейных уравнений, подобных (37), где K – количество совмещенных хроматографических пиков, после чего любым известным методом, например, использованным здесь методом Крамера, получить оценки искомым коэффициентов для каждого из пиков. Помимо прочего, анализ погрешностей работы алгоритма по-

казывает, что δ_σ и δ_{μ_0} существенно влияют на погрешность определения коэффициентов асимметрии и эксцесса, но на форму восстановленного по оценкам коэффициентов сигнала влияние значительно слабее. Тем не менее для практического применения рассмотренного алгоритма требуется предварительная оценка μ_0 и σ , причем с погрешностью не более нескольких процентов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сайфуллин Р.Т., Бочкарев А.В. Выбор необходимого числа базисных функций в алгоритмах кодирования-декодирования сигналов аналитических приборов // Информационно-измерительные и управляющие системы: межвуз. сб. науч. статей. – 2019. – Вып. 1(17). – С. 35–42.
2. Сайфуллин Р.Т., Бочкарев А.В. Иерархическое кодирование при обработке сигналов аналитических приборов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XXI Международной конференции. – Самара: Самарский научный центр РАН, ИПУ СС РАН, 2019. – Т. 1. – С. 467–470.
3. Сайфуллин Р.Т., Бочкарев А.В. Использование функций Чебышева – Эрмита в обработке сигналов аналитических приборов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2019. – № 1(61). – С. 68–81.
4. Сайфуллин Р.Т., Бочкарев А.В. Вычисление производных аналитического сигнала в базе функций Чебышева – Эрмита // Материалы XI Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (27–30 мая 2019 г., Самара, Россия). Т. 2. – 2019. – С. 137–139.
5. Сайфуллин Р.Т., Бочкарев А.В. Вычисление непрерывного вейвлет-преобразования сигналов в базе функций Чебышева – Эрмита // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2019. – № 2(62). – С. 99–113.
6. Сайфуллин Р.Т., Бочкарев А.В. Алгоритм вычисления коэффициентов вейвлет-преобразования сигналов с использованием базиса функций Чебышева – Эрмита // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2019. – № 4(64). – С. 113–124.
7. Xue Luo. Spectral viscosity method with generalized Hermite functions for nonlinear conservation laws // *Applied Numerical Mathematics*, Volume 123, 2018. P. 256–274.
8. Martens J.B. The Hermite transform – applications // *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1990. Vol. 38. No. 9. P. 1607–1618.
9. Павельева Е.А., Крылов А.С. Поиск и анализ ключевых точек радужной оболочки глаза методом преобразования Эрмита // *Информатика и ее применения*. – 2010. – № 1. – Т. 4. – С. 79–82.
10. Estudillo-Romero A., Escalante-Ramirez B. The Hermite transform: An alternative image representation model for iris recognition // *LNCS*, 2008. No. 5197. P. 86–93.
11. Мамаев Н.В. Алгоритм нелокального среднего на основе разложения по функциям Эрмита в задачах компьютерной томографии // Мамаев Н.В., Лукин А.С., Юрин Д.В., Глазкова М.А., Сеницин В.Е. – ГРАФИКОН'2013. Труды конференции, 2013. – С. 254–258.
12. Горлов В.А., Паршин Д.С., Разложение функции с экспоненциальным ростом в ряд Фурье по ортогональным полиномам Чебышева – Эрмита // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3. – № 8–3 (19–3). – С. 245–248.
13. Нейросетевой анализ и сопоставление частотно-временных векторов на основе краткосрочного спектрального представления и адаптивного преобразования Эрмита / Ю.М. Баяковский, А.О. Жирков, Д.Н. Корчагин, А.С. Крылов, А.С. Лукин. Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша, 2001, 087.
14. Балакин Д.А., Штыков В.В. Построение ортогонального банка фильтров на основе преобразований Эрмита для обработки сигналов // *Журнал радиоэлектроники*. – 2014. – № 9. – С. 1–15.
15. Felinger A. *Data Analysis and Signal Processing in Chromatography (Volume 21) (Data Handling in Science and Technology, Volume 21) 1st Edition*. Amsterdam, Elsevier, 1998. 334 p.
16. McQuarrie D.A. On the Stochastic Theory of Chromatography // *J. Chem. Phys.* 1963, vol. 38. Pp. 437–445.

17. Dondi F., Remelli M. Characterization of Extracolumn and Concentration-Dependent Distortion of Chromatographic Peaks by Edgeworth-Cramer Series // *J. Chromatogr.* 1984, vol. 315. Pp. 67–73.
18. Dondi F., Pulidori F. Applicability Limits of the Edgeworth-Cramer Series in Chromatographic Peak Shape Analysis // *J. Chromatogr.* 1984, vol. 284. Pp. 293–301.
19. Dubrovkin J. Mathematical Methods for Separation of Overlapping Asymmetrical Peaks in Spectroscopy and Chromatography. Case study: One-Dimensional Signals // *International J. of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences.* 2015, vol. 11(1) . Pp. 1–8.
20. Суетин П.К. Классические ортогональные многочлены / 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Физматлит, 2007. – 480 с.
21. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. – М.: Физматгиз, 1963. – 1100 с.

Статья поступила в редакцию 21 сентября 2020 г.

CALCULATING OF ASYMMETRY AND EXCESS COEFFICIENTS FOR CHROMATOGRAPHIC PEAKS BY USING CHEBYSHEV – HERMITE FUNCTIONS AND GRAM – CHARLIER SERIES

R.T. Sayfullin, A.V. Bochkarev

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *The paper deals with the development of an algorithm for computation of excess and asymmetry coefficients for chromatographic peak, given by Gram-Charlier series. Investigation of possibility using direct transformation of coefficients of signal decoding in Chebyshev-Hermite basis to terms of the Gram-Charlier series weights are described. By applying coding in Chebyshev-Hermite basis algorithm to Gram-Charlier series system of linear equations that depend of excess and asymmetry coessicients are formed. Solution of this system of equations is sought coefficients. Errors of formed algorithm are described in dependence to errors of estimation shift and RMS width. The computer algebra system Wolfram Mathematica 11.3 was used for calculations and graphical presentation of the simulation results.*

Keywords: *Chebyshev – Hermite functions, Gram – Charlier series, asymmetry, excess, chromatographic peak, signal transform, resolving overlapping signals, chromatography.*

REFERENCES

1. Saifullin R.T., Bochkarev A.V. Selection of the required number of basis functions in the coding-decoding algorithms of signals of analytical instruments // Information and measuring and control systems: mezhvuz. Sat scientific articles. Issue 1 (17). – 2019, p. 35–42.
2. Saifullin R.T., Bochkarev A.V. Hierarchical coding for signal processing of analytical instruments // Problems of control and modeling in complex systems. Proceedings of the XXI International Conference. Samara Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, IPU SS RAS. Volume 1. – 2019, p. 467–470.

*Rauhat T. Sayfullin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Andrey V. Bochkarev, Postgraduate Student.*

3. *Saifullin R.T., Bochkarev A.V.* The use of Chebyshev-Hermite functions in signal processing of analytical instruments // *Bulletin of the Samara State Technical University. Series: technical sciences*, No. 1 (61). – 2019, p. 68–81.
4. *Saifullin R.T., Bochkarev A.V.* Calculation of derivatives of the analytical signal in the basis of Chebyshev – Hermite functions // *Materials of the XI All-Russian scientific conference with international participation "Mathematical modeling and boundary value problems" (May 27–30, 2019, Samara, Russia)*. Volume 2. – 2019, p. 137–139.
5. *Saifullin R.T., Bochkarev A.V.* Calculation of the continuous wavelet transform of signals in the basis of Chebyshev – Hermit functions // *Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Engineering*, No. 2 (62). – 2019, p. 99–113.
6. *Saifullin R.T., Bochkarev A.V.* Algorithm for calculating the wavelet-transform of the signals using the Chebyshev – Hermit functions // *Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Engineering*, No. 4 (64). – 2019, p. 113–124.
7. *Xue Luo.* Spectral viscosity method with generalized Hermite functions for nonlinear conservation laws // *Applied Numerical Mathematics*, Volume 123, 2018. P. 256–274.
8. *Martens J.B.* The Hermite transform – applications // *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1990. Vol. 38. No. 9. P. 1607–1618.
9. *Paveleva E.A., Krylov A.S.* Search and analysis of key points of the iris by the Hermite transformation method // *Informatics and its applications*. 2010. № 1. v. 4. Pp. 79–82.
10. *Estudillo-Romero A., Escalante-Ramirez B.* The Hermite transform: An alternative image representation model for iris recognition // *LNCS*, 2008. No. 5197. P. 86–93.
11. *Mamaev N.V.* The non-local average algorithm based on the expansion of Ermit functions in computed tomography problems // *Mamaev N.V., Lukin A.S., Yurin D.V., Glazkova M.A., Sinitin V.E.* – GRAPHICON'2013. Conference proceedings, 2013, p. 254–258.
12. *Gorlov V.A., Parshin D.S.* Expansion of a function with exponential growth in a Fourier series in orthogonal Chebyshev – Hermite polynomials // *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*. 2015. Vol. 3. No. 8–3 (19–3). Pp. 245–248.
13. Neural network analysis and comparison of time-frequency vectors based on the short-term spectral representation and adaptive Hermite transform. Yu.M. Bayakovskiy, A.O. Zhirkov, D.N. Korchagin, A.S. Krylov, A.S. Lukin. Preprints IPM them. M.V. Keldysh, 2001, 087.
14. *Balakin D.A., Shtykov V.V.* Construction of an orthogonal filter bank based on Hermite transformations for signal processing // *Journal of Radio Electronics*, 2014, № 9, p. 1–15.
15. *Felinger A.* Data Analysis and Signal Processing in Chromatography (Volume 21) (Data Handling in Science and Technology, Volume 21) 1st Edition. Amsterdam, Elsevier, 1998. 334 p.
16. *McQuarrie D.A.* On the Stochastic Theory of Chromatography // *J. Chem. Phys.* 1963, vol. 38. Pp. 437–445.
17. *Dondi F., Remelli M.* Characterization of Extracolumn and Concentration-Dependent Distortion of Chromatographic Peaks by Edgeworth – Cramer Series // *J. Chromatogr.* 1984, vol. 315. Pp. 67–73.
18. *Dondi F., Pulidori F.* Applicability Limits of the Edgeworth – Cramer Series in Chromatographic Peak Shape Analysis // *J. Chromatogr.* 1984, vol. 284. Pp. 293–301.
19. *Dubrovkin J.* Mathematical Methods for Separation of Overlapping Asymmetrical Peaks in Spectroscopy and Chromatography. Case study: One-Dimensional Signals // *International J. of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences*. 2015, vol. 11(1). Pp. 1–8.
20. *Suetin P.K.* Classical orthogonal polynomials. M.: Fizmatlit, 2005. – 480 p.
21. *Gradshteyn I.S., Ryzhik I.M.* Tables of integrals, sums, series and products. – M.: Fizmatgiz, 1963. – 1100 p.

Электротехника

УДК 621.314:621.365.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ МУЛЬТИГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ СВЧ-НАГРЕВА

И.И. Артюхов¹, А.И. Земцов², Е.К. Пыльская¹, С.В. Молот¹

¹Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

²Самарский государственный технический университет, филиал в г. Сызрани
Россия, 446001, г. Сызрань, ул. Советская, 45

E-mail: ivart54@mail.ru, artex283@mail.ru, ekpylskaya@mail.ru, sve_1992@mail.ru

Аннотация. *Поставлена задача исследования электромагнитных процессов в системе электропитания установки диэлектрического нагрева, в которой СВЧ-колебания создаются группой пакетированных магнетронов промышленного назначения. В среде Matlab с пакетом расширения Simulink разработана имитационная модель, которая позволяет получить информацию о мгновенных и интегральных значениях напряжений и токов в системе электропитания, рассчитать ее энергетические характеристики. Моделирование проведено для случая, когда источниками СВЧ-колебаний являются пакетированные магнетроны 2М164. По результатам моделирования определено влияние параметров сетевого напряжения на режим работы СВЧ-установки и показана необходимость его стабилизации для обеспечения заданного режима работы установки. Показано, что импульсный режим работы магнетронов является причиной искажения потребляемых токов и протекания тока в нейтральном проводе.*

Ключевые слова: *СВЧ-установка, магнетрон, система электропитания, имитационное моделирование.*

Введение

СВЧ диэлектрический нагрев позволяет эффективно реализовывать широкий спектр технологий. Основные преимущества использования СВЧ-нагрева в термических процессах обусловлены особенностями поглощения СВЧ-энергии. СВЧ-энергия преобразуется в теплоту внутри вещества, что приводит к значительной экономии энергии и сокращению времени процессов [1, 2].

Артюхов Иван Иванович (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника».

Земцов Артем Иванович (к.т.н., доц.), заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий».

Пыльская Елена Константиновна (к.ф.-м.н.), доцент кафедры «Электроэнергетика и электротехника».

Молот Светлана Викторовна, ассистент кафедры «Электроэнергетика и электротехника».

Прогресс в разработке генераторов СВЧ-колебаний и хорошие поглощательные свойства многих материалов привели к созданию промышленных установок различного назначения, в том числе конвейерного типа мощностью в десятки киловатт [3]. Большое число таких установок используется, в частности, для термообработки сельскохозяйственной продукции и пищевых продуктов, которые обычно содержат много воды и поэтому хорошо поглощают СВЧ-энергию [4–6].

СВЧ-установка конвейерного типа представляет собой сложную систему, в процессе работы которой необходимо распределить СВЧ-энергию, вырабатываемую одним или несколькими СВЧ-генераторами согласно требованиям технологического процесса. Возможен вариант, когда СВЧ-колебания создаются одним мощным генератором и распределяются затем с помощью волноводной системы. Однако СВЧ-установки конвейерного типа чаще всего выполняют мультигенераторными [7], причем для равномерной загрузки сети количество генераторов принимают кратным трем [8].

Для создания источников СВЧ-энергии в настоящее время имеется широкая гамма электронных приборов. В установках небольшой мощности наиболее часто применяют пакетированные магнетроны (со встроенными магнитами). Для установок большой мощности применяются магнетроны с электромагнитами. В последнее время получают также применение магнетроны комбинированного типа, в которых постоянные магниты дополняются электромагнитами для обеспечения регулировочных свойств.

В качестве источников СВЧ-энергии в установках конвейерного типа часто применяют пакетированные магнетроны мощностью 1,5–2 кВт. Выбор в пользу таких магнетронов объясняется несколькими факторами, один из которых – воздушное охлаждение анода и катода. Магнетроны, позволяющие получить СВЧ-колебания мощностью 3 кВт и более, требуют для своей работы две системы охлаждения. Водяное охлаждение применяется для анода, принудительное воздушное – для катодного блока, где размещается фильтр для защиты от радиопомех. Наличие системы водяного охлаждения заметно усложняет конструкцию СВЧ-установки.

В настоящее время известно много работ, посвященных теоретическому и экспериментальному исследованию схем источников питания, которые применяются в СВЧ-печах бытового назначения, например [9–11]. Процессы в системах электропитания магнетронов для СВЧ-установок промышленного назначения изучены в гораздо меньшей степени. Имеющейся в литературе информации недостаточно для разработки и проектирования мультигенераторных СВЧ-установок. Поэтому было поставлена задача разработать модель, которая позволяет проводить исследования характеристик системы электропитания группы магнетронов для различных сочетаний параметров ее элементов и питающей сети.

Система электропитания магнетронных генераторов

Для функционирования пакетированного магнетрона необходимы два источника питания. Один из них обеспечивает накал катода, другой создает необходимую разность потенциалов между анодом и катодом магнетрона. Так как анод магнетрона соединяется с корпусом СВЧ-установки, то цепь питания накала оказывается под высоким напряжением.

В СВЧ-печах бытового назначения традиционно применяется схема, которая содержит один трансформатор с двумя вторичными обмотками. Низковольтная обмотка обеспечивает накал катода, высоковольтная обмотка с помощью удвоителя напряжения запитывает анодную цепь магнетрона.

Для функционирования магнетронов промышленного назначения требуется более сложная схема организации потоков энергии, так как в соответствии с требованиями на эксплуатацию этих магнетронов необходимо разделить во времени процессы подогрева катода и подачи высокого напряжения на анодную цепь. Кроме того, должна быть предусмотрена возможность регулирования напряжения накала при изменении режима работы магнетрона по анодной цепи.

Схема электропитания СВЧ-установки, в состав которой входят N магнетронных генераторов пакетированного типа, показана на рис. 1. Эта схема разработана в соответствии с требованиями на эксплуатацию магнетрона TOSHIBA 2M164, который генерирует СВЧ-колебания в диапазоне частот от 2440 до 2460 МГц. Средняя выходная мощность магнетрона составляет 1300...1600 Вт [12].

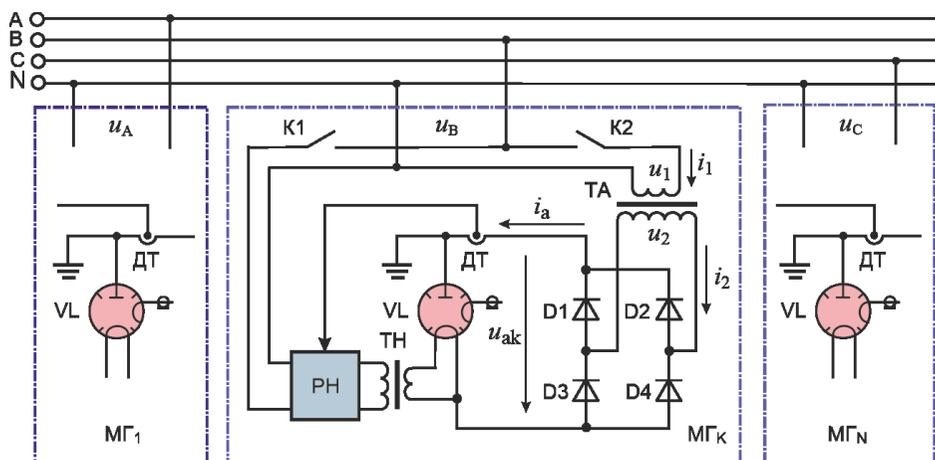


Рис. 1. Схема электропитания группы магнетронов

Необходимое для накала катода напряжение снимается со вторичной обмотки трансформатора ТН, первичная обмотка которого через регулятор напряжения РН и коммутатор К1 подключена к сети. Регулятор напряжения необходим для изменения напряжения накала в процессе разогрева катода и выхода магнетрона VL на рабочий режим.

Для магнетрона 2M164 необходим предварительный прогрев катода в течение некоторого времени (не менее 3 секунд). Поэтому при включении системы электропитания магнетрона VL сначала срабатывает коммутатор К1, в результате чего на цепь накала катода подается напряжение, действующее значение которого составляет 3,6...4,4 В. Затем с помощью коммутатора К2 на анодную цепь подается напряжение, которое создается высоковольтным мостовым выпрямителем D1-D4, присоединенным ко вторичной обмотке повышающего трансформатора ТА.

Имитационная модель системы электропитания

Для разработки и проектирования СВЧ-установки необходима информация об электромагнитных процессах, происходящих в системе электропитания,

о том, как меняется их характер при изменении параметров сети и элементов системы. Такая информация может быть получена путем имитационного моделирования исследуемого объекта в программном комплексе MATLAB+Simulink [13].

Схема модели для исследования системы электропитания СВЧ-установки на базе трех магнетронов 2М164 показана на рис. 2. Заметим, что при ее составлении не учтены элементы цепи накала, так как они потребляют очень малую часть энергии по сравнению с цепями анодного питания.

Сеть промышленной частоты (блок *Three-Phase Source*) представлена тремя источниками переменного напряжения с последовательно соединенными активно-индуктивными сопротивлениями. Такая модель сети позволяет оперативно изменять ее параметры и проводить исследования несимметричных режимов.

Магнетронные генераторы представлены подсистемами *Magnetron Generator* (рис. 3), в состав которых входят блоки, моделирующие пакетированный магнетрон с источником анодного напряжения.

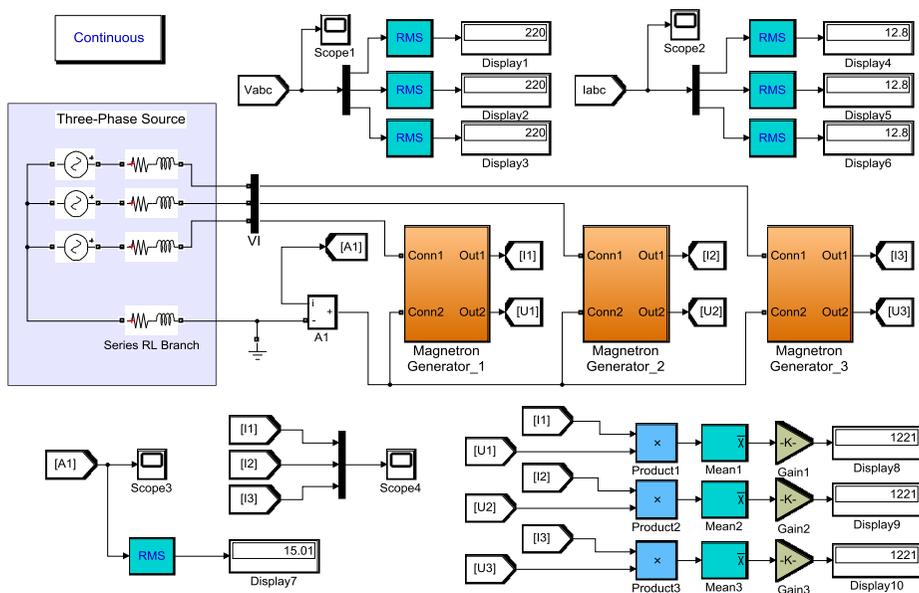


Рис. 2. Имитационная модель системы электропитания

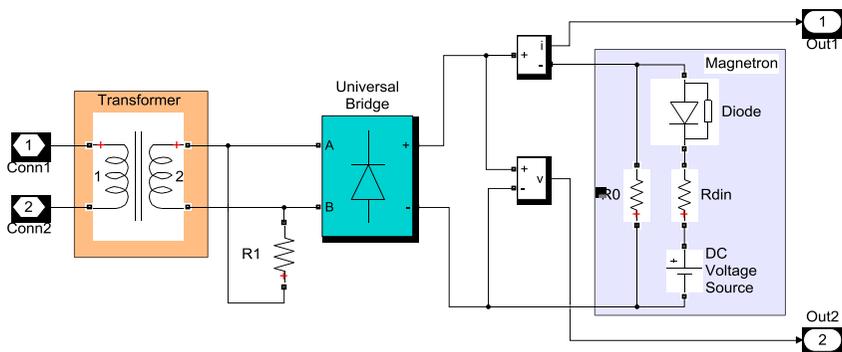


Рис. 3. Схема подсистемы *Magnetron Generator*

При моделировании пакетированного магнетрона использован подход, подразумевающий кусочно-линейную аппроксимацию его вольт-амперной характеристики (ВАХ) [14]. Идеализированная ВАХ магнетрона состоит из двух участков, сопряжение которых происходит в точке, соответствующей пороговому напряжению U_0 . Если напряжение u_{ak} между анодом и катодом магнетрона меньше порогового значения U_0 , то генерации СВЧ-колебаний не происходит. Сопротивление R_0 между анодом и катодом магнетрона составляет сотни кОм. Участок ВАХ магнетрона в этом режиме описывается уравнением

$$u_{ak} = i_a \cdot R_0 .$$

При достижении напряжением на магнетроне порогового значения U_0 возникают колебания, следствием которых является протекание анодного тока i_a . Уравнение ВАХ для участка генерации колебаний имеет вид

$$u_{ak} = U_0 + (i_a - I_0) \cdot R_{din},$$

где R_{din} – динамическое сопротивление магнетрона;
 I_0 – анодный ток в точке перегиба ВАХ.

В режиме генерации СВЧ-колебаний происходит резкое уменьшение сопротивление магнетрона как нагрузки источника анодного питания. Поэтому небольшие изменения анодного напряжения приводят к существенным изменениям анодного тока.

Как показано на рис. 3, магнетрон моделируется схемой замещения в виде последовательно соединенных диода (блок *Diode*), динамического сопротивления (блок *Rdin*) и включенного во встречном направлении источника постоянного напряжения (блок *DC Voltage Source*), величина которого соответствует пороговому напряжению U_0 моделируемого магнетрона. Параллельно указанной цепочке включен резистор R_0 . Для магнетрона 2М164 на основании его паспортных характеристик были приняты следующие значения: $U_0=3100$ В; $R_{din}=100$ Ом; $R_0=100$ кОм.

Цепь анодного питания моделируют блоки *Transformer* и *Universal Bridge*. Параметры блока *Transformer* представлены в табл. 1. В настройках блока *Universal Bridge* принято, что падение напряжение на каждом из диодов высоковольтного моста составляет 15 В.

В составе модели на рис. 2 имеются также блоки *RMS*, предназначенные для расчета действующих значений напряжений и токов. Кривые фазных напряжений и линейных токов можно видеть на экранах виртуальных осциллографов *Scope* с номерами 1 и 2. Их действующие значения отображаются в окнах блоков *Display* с номерами 1–3 и 4–6 соответственно. Информацию о токе нулевого провода позволяют получить *Scope3* и *Display7*. На экране виртуального осциллографа *Scope3* в результате моделирования можно наблюдать анодные токи магнетронов.

В модель включены также элементы (блоки *Product*, *Mean* и *Gain*), с помощью которых вычисляется выходная мощность магнетронного генератора. На основании характеристик магнетрона 2М164 было сделано допущение о том, что его КПД является постоянной величиной. При моделировании эта величина задается в блоке *Gain*. Информация о мощности генераторов отображается дисплеями 8–10.

Параметры блока *Transformer*

Параметр	Единица измерения	Значение
Номинальная мощность	В·А	3200
Частота	Гц	50
<i>Параметры первичной обмотки</i>		
Номинальное напряжение	В	220
Индуктивность рассеяния	Гн	$3,6 \cdot 10^{-3}$
Сопротивление обмотки	Ом	0,6
<i>Параметры вторичной обмотки</i>		
Номинальное напряжение	В	3100...3500
Индуктивность рассеяния	Гн	1,3
Сопротивление обмотки	Ом	135
<i>Параметры цепи намагничивания</i>		
Индуктивность	Гн	8
Сопротивление	Ом	$1 \cdot 10^4$

Результаты моделирования системы электропитания

Одна из задач моделирования состояла в определении влияния сетевого напряжения на режим работы СВЧ-установки. При проведении численных экспериментов было принято, что индуктивность и активное сопротивление источника энергии составляют 50 мкГн и 0,02 Ом соответственно.

На рис. 4 показаны графики зависимости выходной мощности магнетрона от сетевого напряжения в относительных единицах

$$U^* = U_1 / U_{1\text{ном.}}$$

Зависимости рассчитаны для ряда значений коэффициента трансформации

$$n = w_1 / w_2 ,$$

где w_1, w_2 – количество витков первичной и вторичной обмоток соответственно.

Для удобства восприятия и анализа информации на графиках указаны параметры k , обратные коэффициенту трансформации n .

Графики на рис. 4 показывают, что режим работы магнетрона очень сильно зависит от величины сетевого напряжения. Отклонения сетевого напряжения даже в пределах $\pm 10\%$ от номинального значения, что допускает ГОСТ 32144-2013 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», могут привести либо к аварийной ситуации из-за перегрузки магнетрона, либо к существенному уменьшению его выходной мощности. При этом на режим работы магнетрона влияют параметры повышающего трансформатора.

Например, для трансформатора, у которого на холостом ходу напряжение на вторичной обмотке в $k=15$ раз больше напряжения на первичной обмотке, при номинальном значении сетевого напряжения выходная мощность составляет 1400 Вт. При снижении напряжения на 10 % мощность станет менее 800 Вт, т. е. уменьшится более чем на 43 %. Увеличение сетевого напряжения всего на 6 % приведет к работе магнетрона в предельно допустимом режиме.

Изменение параметра k в пределах $\pm 0,9$ относительно значения $k=15$ приводит к изменению мощности на ± 400 Вт относительно значения 1400 Вт. Чтобы

исключить аварийный режим работы, можно выбрать трансформатор с параметром $k=14,1$. Однако в этом случае отклонения сетевого напряжения в пределах, допускаемых ГОСТ 32144-2013, приведут к изменению выходной мощности магнетрона в диапазоне от 500 до 1800 Вт.

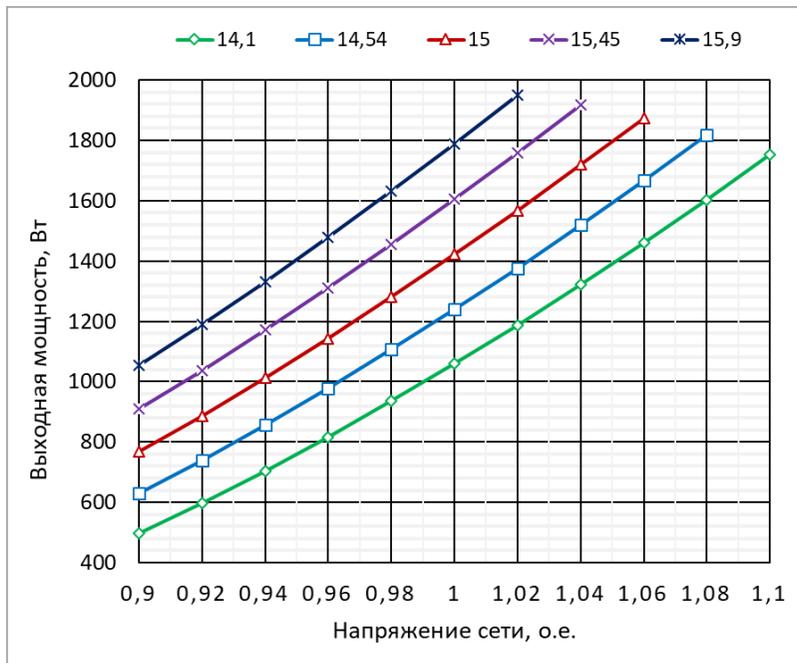


Рис. 4. Зависимость выходной мощности магнетрона от напряжения сети

На основании анализа результатов моделирования может быть дана следующая оценка влияния сетевого напряжения на режим работы СВЧ-установки: изменение напряжения на 1 % приводит к изменению мощности генератора на 4–5 %. Поэтому система электропитания СВЧ-генераторов должна быть оснащена стабилизатором напряжения. Возможные варианты решения проблемы предполагают также использование тиристорных регуляторов напряжения с импульсно-фазовой системой управления [15, 16].

Разработанная модель позволяет исследовать влияние несимметрии напряжений сети на работу СВЧ-установки. В табл. 2 приведены результаты расчета для ситуации, когда на одной из фаз сети напряжение имеет номинальное значение, а на двух других фазах напряжения отличаются на +2 и -2 % от номинального значения. Напряжение на вторичной обмотке трансформатора составляло 3300 В.

Результаты моделирования показывают, что из-за несимметрии напряжений сети мощность СВЧ-генератора, подключенного к фазе В, уменьшилась на 11,7 % относительно мощности генератора, работающего от фазы А. При этом мощность генератора, получающего питание от фазы С, увеличилась на 11,4 %.

Влияние несимметрии напряжений

Фаза	Фазное напряжение, В	Линейный ток, А	Выходная мощность, Вт
А	220	12,81	1221
В	215,6	11,56	1078 (-11,7 %)
С	224,4	14	1361 (+11,4 %)

Осциллограммы анодных токов магнетронов для смоделированной ситуации с несимметрией напряжений показаны на рис. 5.

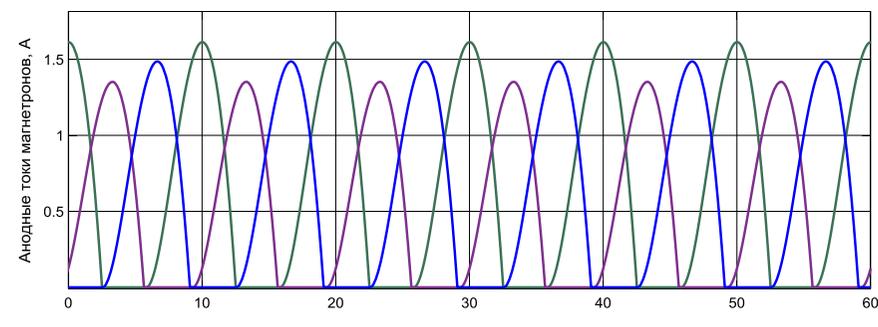


Рис. 5. Осциллограммы анодных токов при несимметрии напряжений сети (по оси абсцисс – время в миллисекундах)

Важным вопросом при разработке СВЧ-установки является определение влияния системы электропитания магнетронов на сеть.

На рис. 6 показаны полученные в результате моделирования осциллограммы напряжений и токов на входе установки, а также нулевого провода. Нелинейность ВАХ магнетрона приводит к импульсному характеру тока, потребляемого из сети. Поэтому в спектре потребляемого тока наряду с основной гармоникой присутствуют высшие гармоники с нечетными номерами.

С помощью встроенного в MATLAB инструмента FFT (быстрое преобразование Фурье) произведен гармонический анализ кривой тока, потребляемого из сети (рис. 7). Результаты анализа показали, что наиболее интенсивной является третья гармоника. Для рассмотренного варианта моделирования системы электропитания она составила 42,58 % относительно первой гармоники. Суммарный коэффициент гармонических составляющих потребляемого тока равен 43,58 %.

Наличие третьей гармоники в потребляемых токах приводит к тому, что по нейтральному проводу протекает ток, частота которого равна 150 Гц, а действующее значение соизмеримо с действующим значением линейных токов. Для рассмотренного примера моделирования действующие значения потребляемых токов составили 12,8 А. Ток нейтрального провода достиг значения 15 А.

Протекание тока 150 Гц значительной величины по нейтральному проводу необходимо учитывать при проектировании сети, от которой предполагается питание мультигенераторной СВЧ-установки рассмотренного типа.

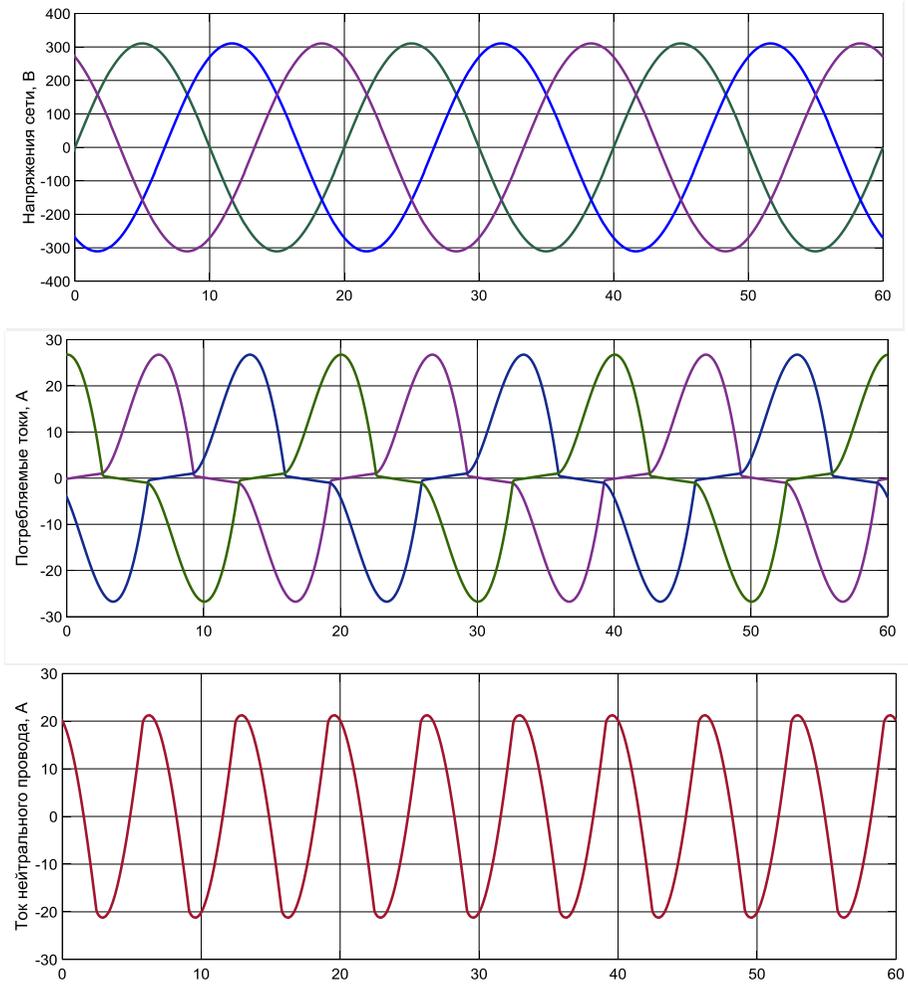


Рис. 6. Осциллограммы напряжений и токов
(по оси абсцисс – время в миллисекундах)

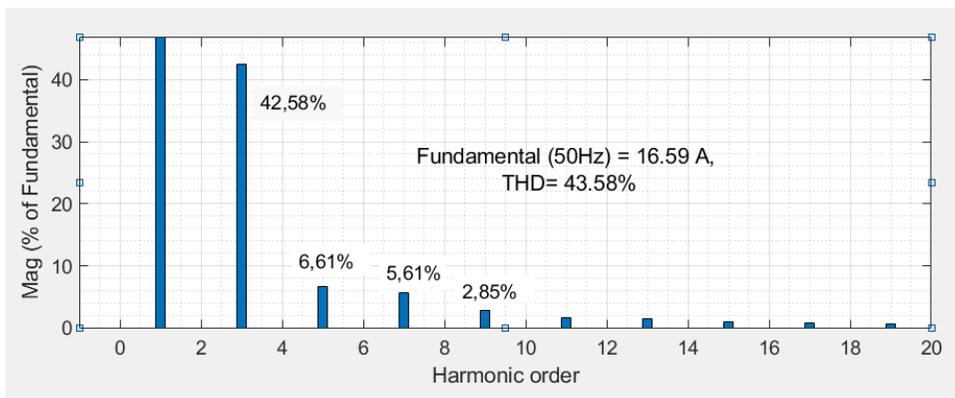


Рис. 7. Гармонический состав потребляемого тока

Необходимость соединения первичных обмоток в «звезду» у повышающих трансформаторов обусловлена тем, что серийные образцы этих трансформаторов изготавливают с первичной обмоткой, рассчитанной на напряжение 220 В. С одной стороны, это позволяет унифицировать оборудование для различных типов СВЧ-установок. С другой стороны, указанное соединение первичных обмоток обеспечивает электробезопасность высоковольтных установок путем заземления одного из выводов первичной обмотки трансформатора.

Заключение

Для исследования системы электропитания, обеспечивающей функционирование пакетированных магнетронов в мультигенераторной СВЧ технологической установке, разработана имитационная модель в среде MATLAB с пакетом расширения Simulink. При моделировании пакетированного магнетрона использован подход о кусочно-линейной аппроксимации его ВАХ. На основании результатов имитационного моделирования рассчитаны характеристики системы электропитания. Установлено, что в результате отклонения сетевого напряжения на 1 % изменения выходной мощности установки составляют от 4 до 5 %.

Из-за импульсного режима работы магнетронов потребляемые из сети токи имеют несинусоидальную форму. Их спектр содержит нечетные гармонические составляющие, причем наиболее интенсивной является гармоника с номером 3.

Наличие в спектре потребляемых токов третьей гармоники приводит к возникновению тока в нейтральном проводе, причем величина этого тока может превышать линейные токи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Okress E. Microwave Power Engineering. Vol. 1. New York: Acad. Press, 1968.
2. Архангельский Ю.С. Справочная книга по СВЧ электротермии. – Саратов: Научная книга, 2011. – 506 с.
3. Морозов О., Каргин А., Савенко Г., Требух В., Воробьев И. Промышленное применение СВЧ-нагрева // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2010. – № 3. – С. 2–6.
4. Methlouthi A., Rouaud O., Boillereaux L. Microwave Applicator with Conveyor Belt System // Microwave Journal, May 12, 2011 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.microwavejournal.com/articles/12469-microwave-applicator-with-conveyor-belt-system>.
5. Puangsuwan K., Tongurai C., Chongcheawchamnan M. Design of Microwave Heating Continuous Belt System for Palm fruit // Proceedings of the 2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). DOI: 10.1109/APMC.2015.7413502.
6. Massalfa Microwave [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.massalfa.org/factory-22110-microwave-dryer>.
7. Артюхов И.И., Земцов А.И. Направления совершенствования мультигенераторных СВЧ электротехнологических установок // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 1. – № 3(54). – С. 149–154.
8. Bahani B., Bouzit A., Chraygane M., Ferfra M., Ghazal N.El., Belhaiba A. Modeling of a New High Voltage Power Supply for Microwave Generators with Three Magnetrons // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 2013. Vol. 3, N. 2. Pp. 164–170.
9. Kako H., Nakagawa T., Narita R. Development of Compact Inverter Power Supply for Microwave Oven // IEEE Transactions on Consumer Electronics. Vol. 37. N. 3. Pp. 611–616.
10. Surducun V., Surducun E., Ciupa R. Variable Power, Short Microwave Pulses Generation Using a CW Magnetron // Advances in Electrical and Computer Engineering. 2011. Vol. 11. Iss. 2. Pp. 49–54.
11. Zhang Y., Chen Y., Zhang B. Modeling and Analysis of the Stable Power Supply Based on the Magnetic Flux Leakage Transformer // 2014 International Power Electronics and Application Conference and Exposition, Shanghai. Pp. 614–618.

12. TOSHIBA Industrial Magnetron 2M164 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.hokuto.co.jp/eng/products/ind_magnetron/pdf/2M164_E.pdf
13. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
14. Yang Y.-R. A Magnetron Power Supply with Transition-Mode Zero-Voltage-Switching Inverter // Journal of Energy and Power Engineering. 2013. Vol. 7. Iss. 8. Pp. 1571–1577.
15. Heggannavar M., Kulkarni H. Design of Magnetron Power Source from Three phase Supply // 2015 International Conference on Energy Systems and Applications. Pune, 2015. Pp. 552–556.
16. Артюхов И.И., Земцов А.И., Гордеев Е.С. Имитационная модель регулируемого источника анодного напряжения для пакетированного магнетрона промышленного назначения // Вопросы электротехнологии. – 2016. – № 4(13). – С. 33–38.

Статья поступила в редакцию 4 октября 2020 г.

SIMULATION AND RESEARCH OF THE POWER SUPPLY SYSTEM FOR MULTIGENERATOR MICROWAVE HEATING INSTALLATION

I.I. Artyukhov¹, A.I. Zemtsov², E.K. Pylskaya¹, S.V. Molot¹

¹Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
77, Politechnicheskaya st., Saratov, 410054, Russian Federation

²Syzran Branch of Samara State Technical University
45, Sovetskaya st., Syzran, 446001, Russian Federation

Abstract. *The task is to study electromagnetic processes in the power supply system of a dielectric heating installation, in which a group of industrial packaged magnetrons creates microwave oscillations. A simulation model of the power supply system for multigenerator microwave heating installation was created in the Matlab&Simulink programming environment. The model allows you to obtain information of voltage and current instantaneous and integral values in the power supply system, and to calculate energy characteristics of the system. Simulation was carried out for the case when the sources of microwave oscillations are "2M164" packaged magnetrons. Based on the simulation results, the influence of the mains voltage parameters on the operating mode of the microwave installation was determined also the need for voltage stabilization was shown to ensure the preset operating mode of the installation. It is shown that the pulsed operation mode of magnetrons is the cause of the consumed current distortion and the current presence in the neutral wire.*

Keywords: *microwave installation, magnetron, power supply system, simulation.*

REFERENCES

1. Okress E. Microwave Power Engineering. Vol. 1. New York: Acad. Press, 1968.
2. Arkhangel'skij Yu.S. Spravochnaya kniga po SVCH elektrotermii. Saratov: Nauchnaya kniga, 2011. 506 s. (In Russian).
3. Morozov O., Kargin A., Savenko G., Trebuh V., Vorob'ev I. Promyshlennoe primeneniye SVCH-nagreva // Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes. 2010. № 3. P. 2–6. (In Russian).

Ivan I. Artyukhov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

Artem I. Zemtsov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Elena K. Pylskaya (Ph.D. (Phys. & Math.)), Associate Professor.

Svetlana V. Molot, Assistant.

4. *Methlouthi A., Rouaud O., Boillereaux L.* Microwave Applicator with Conveyor Belt System // *Microwave Journal*, May 12, 2011 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.microwavejournal.com/articles/12469-microwave-applicator-with-conveyor-belt-system>.
5. *Puangsuwan K., Tongurai C., Chongcheawchamnan M.* Design of Microwave Heating Continuous Belt System for Palm fruit // *Proceedings of the 2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*. DOI: 10.1109/APMC.2015.7413502.
6. *Massalfa Microwave* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.massalfa.org/factory-22110-microwave-dryer>.
7. *Artyukhov I.I., Zemtsov A.I.* Napravleniya sovershenstvovaniya mul'tigeneratoryh SVCH elektrotekhnologicheskikh ustanovok // *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011. T. 1. № 3(54). P. 149–154. (In Russian).
8. *Bahani B., Bouzit A., Chraygane M., Ferfra M., Ghazal N. El., Belhaiba A.* Modeling of a New High Voltage Power Supply for Microwave Generators with Three Magnetrons // *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2013. Vol. 3, N. 2. Pp. 164–170.
9. *Kako H., Nakagawa T., Narita R.* Development of Compact Inverter Power Supply for Microwave Oven // *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. Vol. 37. N. 3. Pp. 611–616.
10. *Surducan V., Surducan E., Ciupa R.* Variable Power, Short Microwave Pulses Generation Using a CW Magnetron // *Advances in Electrical and Computer Engineering*. 2011. Vol. 11. Iss. 2. Pp. 49–54.
11. *Zhang Y., Chen Y., Zhang B.* Modeling and Analysis of the Stable Power Supply Based on the Magnetic Flux Leakage Transformer // *2014 International Power Electronics and Application Conference and Exposition, Shanghai*. Pp. 614–618.
12. *TOSHIBA Industrial Magnetron 2M164*. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.hokuto.co.jp/eng/products/ind_magnetron/pdf/2M164_E.pdf
13. *CHernyh I.V.* Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustrojstv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink. Moscow.: DMK Press; St. Petersburg: Piter, 2008. 288 p. (In Russian).
14. *Yang Y.-R.* A Magnetron Power Supply with Transition-Mode Zero-Voltage-Switching Inverter // *Journal of Energy and Power Engineering*. 2013. Vol. 7. Iss. 8. Pp. 1571–1577.
15. *Heggannavar M., Kulkarni H.* Design of Magnetron Power Source from Three phase Supply // *2015 International Conference on Energy Systems and Applications*. Pune, 2015. Pp. 552–556.
16. *Artyukhov I.I., Zemtsov A.I., Gordeev E.S.* Imitatsionnaya model' reguliruемого istochnika anodnogo napryazheniya dlya paketirovannogo magnetrona promyshlennogo naznacheniya // *Voprosy elektrotekhnologii*. 2016. № 4(13). P. 33–38. (In Russian).

УДК 620.9.001.5

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ С АКТИВНО-АДАПТИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Ю.П. Кубарьков, Я.В. Макаров, К.А. Солдаткина

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. Как правило, электроснабжение потребителей обеспечивается от собственных источников электроэнергии или от имеющихся электрических сетей. Поэтому важной задачей является разработка мер для поддержания качества электрической энергии на шинах конечного потребителя. Распределенное производство электроэнергии предполагает строительство дополнительных источников электрической энергии в непосредственной близости от потребителей. В настоящее время основными интересами потребителей являются возможности резервирования за счет экономии уменьшения расходов, увеличенный КПД совместной генерации тепла и электроэнергии. Различные энергетические компании начали активнее полагаться на уже имеющуюся поддержку от источников распределенной генерации во время пиковых нагрузок, на применение собственных мощностей для уменьшения потерь и совершенствования параметров работы сети. Альтернативная генерация может стать дополнительным источником активной мощности. На объекты распределенной генерации в настоящее время в России приходится порядка семи процентов от всего объема выработки электрической энергии. Этот показатель в два раза меньше, чем показатели мирового масштаба, но как явление распределенная генерация уже состоялась в России, и эта отрасль активно развивается. Значительный износ основных средств в энергетических комплексах, большая аварийность, плановые и внеплановые отключения являются одними из весомых проблем энергетической сферы России. Возобновляемая энергетика является направлением альтернативной энергетики, которое основано на применении практически неисчерпаемых ресурсов для выработки электроэнергии (солнечной, ветряной, речной, морской, геотермальной и др.). У возобновляемой энергетики есть как преимущества, так и недостатки. Газовая распределенная генерация является наиболее эффективной технологией энергетики. Популярность распределенной генерации, внедрение «умных» сетей имеют много предпосылок. Выгоды, которые получает владелец распределенной генерации, очевидны.

Ключевые слова: потери мощности, распределенная генерация, стабильность напряжения, газовая распределенная генерация, параметры работы сети, возобновляемая энергетика.

Введение

Новые технологии, такие как распределенная генерация, в последнее время активно внедряются в электрические сети [1].

Кубарьков Юрий Петрович (д.т.н., доц.), профессор кафедры «Электрические станции».

Макаров Ярослав Викторович, старший преподаватель кафедры «Электрические станции».

Солдаткина Кристина Анатольевна, аспирант.

Распределенное производство электроэнергии – строительство распределительных сетей и источников энергии – подразумевает наличие определенного количества потребителей, которые производят электроэнергию на собственные нужды, а помимо этого направляют лишнее в общую электрическую или тепловую сеть.

Промышленно развитые страны осуществляют производство большей части электрической энергии централизованно, на больших электростанциях (тепловых, электростанциях, гидроэлектростанциях) [2]. Наиболее мощные электростанции имеют отличные экономические данные и обычно производят передачу электроэнергии на значительные расстояния. Места строительства многих из них объясняются множеством экономических, географических, экологических факторов, а также мерами безопасности и требованиями охраны окружающей среды.

Распределенное производство электроэнергии представляет собой строительство дополнительных источников электрической энергии вблизи от потребителей. Нагрузка такого рода источников определяется с учетом ожидаемой мощности потребителей, имеющихся ограничений (технологических, правовых, экологических и т. д.) и может изменяться в больших пределах (от двух-трех до сотен киловатт). При этом потребители не отключаются от общей электрической сети [3].

На объекты распределенной генерации в настоящее время в России приходится порядка семи процентов от всего объема выработки электрической энергии. Этот показатель в два раза меньше, чем показатели мирового масштаба, но как явление распределенная генерация уже состоялась в России, и эта отрасль активно развивается. Значительный износ основных средств в энергетических комплексах, большая аварийность, плановые и внеплановые отключения являются одними из весомых проблем энергетической сферы России [4].

Возобновляемая энергетика является направлением альтернативной энергетики, которое основано на применении практически неисчерпаемых ресурсов для выработки электрической энергии. Дополнительными источниками электрической энергии могут являться и средства альтернативной энергетики (солнечные батареи, ветровые установки, топливные элементы), и традиционные когенерационные установки (КГУ) малых и средней мощности [5]. В случае с КГУ благодаря их установке непосредственно вблизи потребителей предоставляется возможность использования не только вырабатываемой электроэнергии, но также и побочной тепловой энергии на отопительные нужды, горячего водоснабжения или абсорбционного холодоснабжения самого владельца КГУ или сторонних потребителей, которые расположены вблизи [6]. Данное мероприятие позволит добиваться наибольшей эффективности использования топлива в пределах до 90 % от потенциальной энергии.

У возобновляемой энергетики есть и преимущества, и недостатки [7].

К преимуществам относят:

- возобновляемые источники электроэнергии;
- экологически чистые источники электроэнергии;
- низкую себестоимость электроэнергии.

К недостаткам относят:

- полную зависимость от внешних факторов;
- варьируемое качество энергии;
- большую стоимость;
- необходимость в дополнительном оборудовании;

– низкий коэффициент использования установленной мощности.

Двигательная нагрузка имеет наиболее значимые показатели, которыми являются отклонение напряжений от номинальных значений и отклонение частоты. Указанные показатели могут быть в допустимых пределах на шинах главной понижительной подстанции, однако выходить за данные пределы на шинах конечных потребителей недопустимо [8]. Поэтому наиболее важной задачей является разработка мероприятий для поддержания качества электрической энергии на шинах конечных потребителей.

Распределенная генерация (РГ)

Распределенная генерация представляет собой оптимальное расположение дополнительных источников электрической энергии вблизи от потребителей [9].

Близость источников напряжения увеличивает надежность энергоснабжения и уровня напряжения в сети. Надежность энергоснабжения не зависит от возникновения нештатных ситуаций в сетевом хозяйстве. Техногенные аварии всегда происходили и будут происходить. Поэтому так необходим резервный вариант энергоснабжения [10]. При расширении производства на предприятии существенно сокращаются сроки получения дополнительных энергетических мощностей, поскольку нет необходимости ожидать развития необходимой инфраструктуры поставщиками электроэнергии. Дополнительным преимуществом может стать когенерация тепла, делающая РГ наиболее выгодной. И, наконец, все затраты на энергоснабжение можно заранее просчитать [11].

Сравнивая распространенные на данный момент технологии распределенной генерации с централизованной генерацией, в большинстве случаев предоставляют для распределенной генерации наиболее высокие капитальные и текущие затраты (долларов/кВт.ч). В свою очередь, возможные дополнительные плюсы в качестве когенерации тепла, повышения надежности, отсутствия издержек в сети уже в настоящее время представляют распределенную генерацию выгодной во многих применениях [12]. Адекватная рыночная оценка преимуществ – это ключевой фактор, определяющий перспективность такого рода проектов. Совершенствование технологий продвигает на больший уровень оправданности с экономической точки зрения все больше вариантов применения распределенной генерации.

В настоящее время основными интересами потребителей являются возможности резервирования за счет экономии, уменьшения расходов, увеличенный КПД одновременной генерации тепла и электрической энергии. Энергетические компании активно начали полагаться на значительную поддержку от источников распределенной генерации во время пиковых нагрузок, а также на применение данных мощностей для уменьшения потерь и совершенствования параметров работы сети [13].

Для РГ применяются как продукты новейших технологий, так и установки, ставшие традиционными. Традиционными являются различные установки внутреннего сгорания (лидирующие позиции занимают дизели и двигатели, которые работают как на газе, так и на дизельном топливе).

Газовая распределенная генерация является наиболее эффективной технологией электроэнергетики [14]. В настоящее время отрасль малой генерации, которая основана на применении мобильных и самых эффективных газопоршневых установок, представляет собой современный, эффективный и высококорентабель-

ный вид энергетического бизнеса, который стремительно набирает популярность за последние годы.

Основные предпосылки развития газовой генерации в мире [15]:

- наиболее доступное топливо;
- природный газ представляет собой самый доступный и эффективный вид топлива в перспективе на ближайшие десятилетия;
- плавный отказ от применения угольного топлива;
- уголь – это дорогой и неэкологичный вид топлива. В основном в последнее время это подтверждается переводом наиболее крупных электростанций на газовое топливоснабжение;
- уменьшение части атомной энергетики;
- атомная энергетика представляет собой дорогой вид выработки электрической энергии с огромной долей технологического риска. Этот факт подтверждается сворачиванием или снижением части ядерной выработки в энергетических проектах в России и во всем мире;
- высокая доля эффективности когенерации и тригенерации;
- тепловая малая генерация, базирующаяся на ГПУ и являющаяся самым высокоэффективным средством выработки электрической энергии, позволяет получать попутные виды энергии в виде тепловой энергии и холода [16].

Исследования и расчеты

На рис. 1 приведена расчетная схема электрической сети. Параметры линий электропередач (ЛЭП) приведены в табл. 1, а параметры трансформаторов – в табл. 2, нагрузка по узлам сети приведена в табл. 3.

Было проведено исследование модели электрической сети с последовательным подключением источника распределенной генерации на шины каждой подстанции для компенсации собственной нагрузки подстанции.

Положительный эффект от внедрения источников будет зависеть от величины нагрузки и топологии сети.

Для определения оптимального места установки источников распределенной генерации (РГ) необходимо выбрать класс напряжения, на котором они будут устанавливаться. Т. к. в схеме присутствует мощная двигательная нагрузка и основная сеть имеет класс напряжения 6,3 кВ, то эти источники будут установлены на данном классе напряжения. Также подобное упрощение поможет несколько сократить количество возможных узлов установки.

Оценка эффективности установки источников РГ в различных узлах сети производилась по критерию отклонения среднего значения напряжения в сети 6,3 кВ, т. к. на этом классе напряжения они будут установлены. При этом данный критерий определялся для каждой из независимых частей схемы. Например, для первой части схемы среднее значение напряжения определялось по следующей формуле:

$$U_{cp(1)} = \frac{U_3 + U_4 + U_6 + U_8 + U_9 + U_{11} + U_{12} + U_{14} + U_{16} + U_{18} + U_{20}}{11}, \quad (1)$$

где $U_3, U_4, U_6, U_8, U_9, U_{11}, U_{12}, U_{14}, U_{16}, U_{18}, U_{20}$ – напряжение в соответствующих узлах сети для расчетного режима.

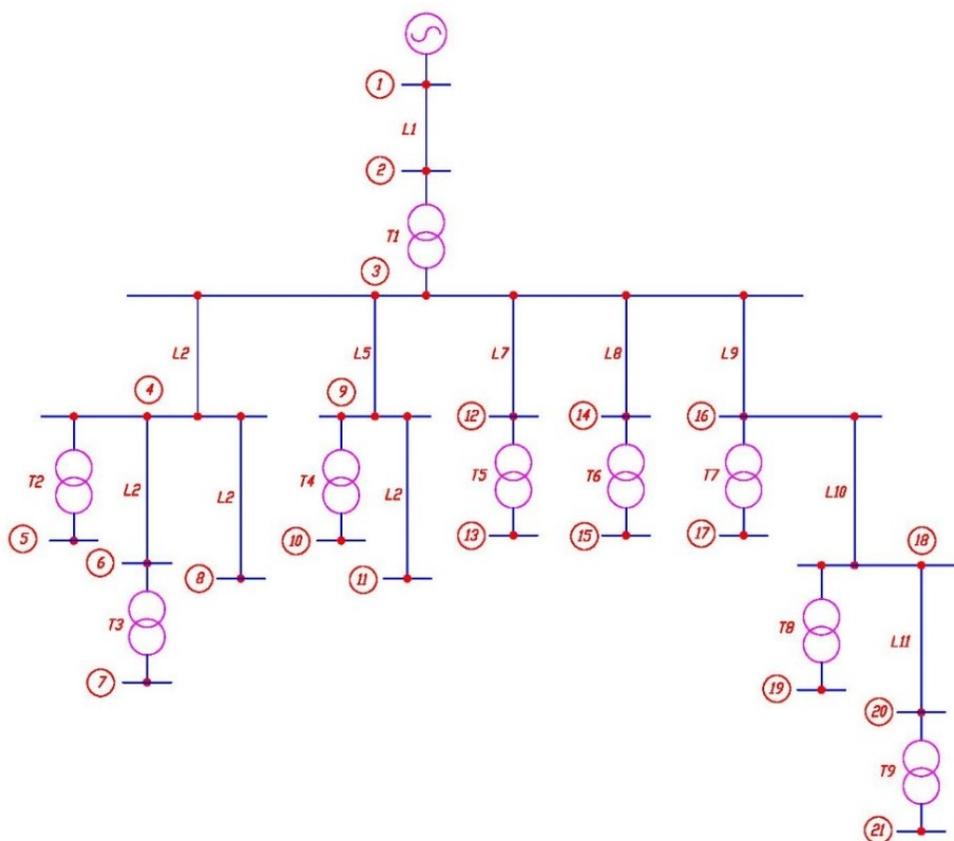


Рис. 1. Схема электрической сети

Таблица 1

Параметры ЛЭП на схеме замещения

Наименование	Начало	Конец	Марка и сечение провода	Длина, м	$U_{\text{вн}}$
L1	1	2	ОСБ-95	2368	35
L2	3	4	АСБ-120	536	6,3
L3	4	6	АСБ-120	400	6,3
L4	4	8	АСБ-120	400	6,3
L5	3	9	АСБ-95	390	6,3
L6	9	11	АСБ-95	300	6,3
L7	3	12	АСБ-95	380	6,3
L8	3	14	АСБ-185	322	6,3
L9	3	16	АСБ-120	1050	6,3
L10	16	18	АСБ-185	140	6,3
L11	18	20	АСБ-120	460	6,3

Таблица 2

Параметры трансформаторов на схеме замещения

Наименование	Начало	Конец	U _{вн} , кВ	U _{шт} , кВ
T1 (ТДНС 16000/35)	2	3	35	6,3
T2 (400 кВА, 4,65 %)	4	5	6,3	0,4
T3 (1000 кВА)	6	7	6,3	0,4
T4 (750 кВА, 5,5 %)	9	10	6,3	0,4
T5 (630 кВА, 5,44 %)	12	13	6,3	0,4
T6 (1000 кВА, 5,76 %)	14	15	6,3	0,4
T7 (1000 кВА, 5,5 %)	16	17	6,3	0,4
T8 (1000 кВА, 5,54 %)	18	19	6,3	0,4
T9 (1000 кВА, 5,8 %)	20	21	6,3	0,4

Таблица 3

Нагрузка по узлам

Номер узла	U _{ном} , кВ	P _н , кВт	Q _н , кВА
4	6,3	400	226
5	0,4	110,4	47
7	0,4	276	117
10	0,4	202,4	86
13	0,4	174,8	74,5
14	6,3	315	180
15	0,4	276	117
16	6,3	320	180
17	0,4	276	117
19	0,4	276	117
21	0,4	276	117

Для нормального режима среднее значение напряжения в первой части сети будет составлять

$$U_{cp(1) \text{ нр}} = (621419 + 619374 + 618862 + 619375 + 620946 + 620947 + 621038 + 620841 + 61562 + 615397 + 614791) / 11 = 6189,65 \text{ В.} \quad (2)$$

Результаты расчета приведены на рис. 2.

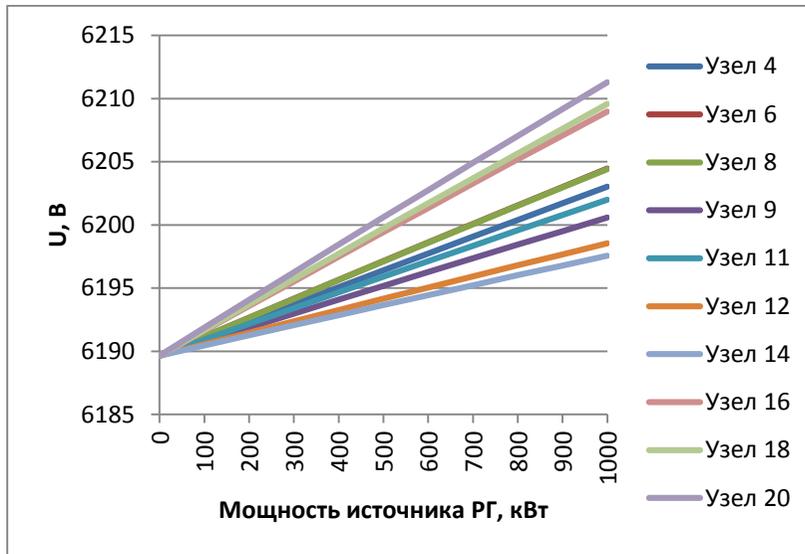


Рис. 2. Изменение средних уровней напряжений в узлах сети 6,3 кВ при установке источников РГ различной мощности

Используя данные, полученные при расчете режимов для первой части схемы при установке источников РГ, и критерий среднего значения напряжения, получаем следующий приоритет узлов для установки источников РГ: 1) узел № 20; 2) узел № 18; 3) узел № 16.

Таблица 4

Потери активной мощности в сети

$P_{РГ}$, кВт	0	500	1000	1500	2000	2500
ΔP , кВт	34,6	25,1	21,5	23,8	31,6	44,8

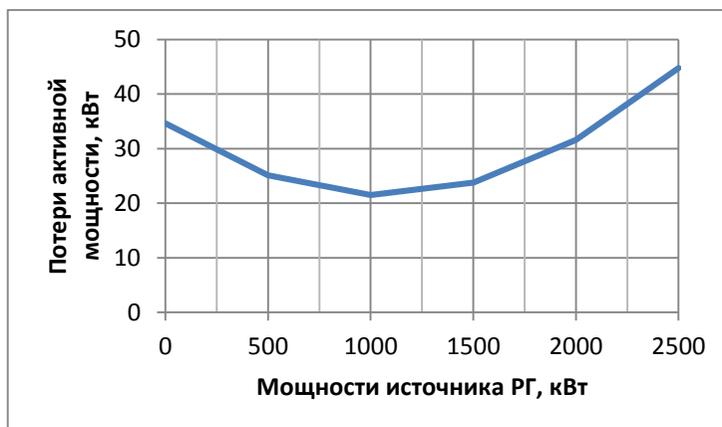


Рис. 3. Зависимость потерь активной мощности в сети от мощности источника РГ в узле № 20

Из приведенных рисунков очевидно линейное увеличение среднего значения напряжения как в первой, так и во второй части схемы при установке источников РГ в соответствующие узлы электрической схемы и равномерном увеличении их мощности. Таким образом, можно заключить, что при использовании критерия увеличения среднего значения напряжения в электрической сети определенного класса напряжения достаточно будет установить источник РГ нормированной мощности в каждый из рассматриваемых узлов сети, рассчитать и сравнить средние значения напряжения.

Для определения величины активной мощности, которую будет вырабатывать источник РГ, установленный в узел № 20, был проведен ряд расчетов режимов работы и получены значения потерь активной мощности в сети. Данные представлены в табл. 4 и на рис. 3.

Представленная зависимость может быть описана полиномом третьего порядка:

$$\Delta P(P) = -0,2741 \cdot P^3 + 12,3921 \cdot P^2 - 25,1894 \cdot P + 34,6063. \quad (3)$$

Найдем производную первого порядка от полученного уравнения и приравняем ее к нулю:

$$\Delta P'(P) = -0,8223 \cdot P^2 + 24,7842 \cdot P - 25,1894 = 0. \quad (4)$$

Тогда корни данного уравнения будут:

$$P_1 = 29,0869 \quad P_2 = 1,0531 \quad (5)$$

Подходящий корень уравнения P_2 – это величина мощности источника РГ в МВт, т. е.

$$P_{РГ}(20) = 1,0531 \text{ МВт} = 10531 \text{ кВт} \quad (6)$$

При подстановке полученного значения мощности в исходное уравнение получим расчетное значение потерь активной мощности:

$$\begin{aligned} \Delta P(1,0531) &= -0,2741 \cdot 1,0531^3 + 12,3921 \cdot 1,0531^2 - \\ &- 25,1894 \cdot 1,0531 + 34,6063 = 21,5 \text{ кВт}. \end{aligned} \quad (7)$$

Аналогичным образом были определены величина активной мощности, которую будет вырабатывать источник РГ для узлов № 18 и № 16, и значения потерь:

$$P_{РГ}(18) = 1,3355 \text{ МВт} = 13355 \text{ кВт} \quad (8)$$

$$P_{РГ}(16) = 1,3839 \text{ МВт} = 13839 \text{ кВт} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Delta P(1,3355) &= -0,1185 \cdot 1,3355^3 + 8,973 \cdot 1,3355^2 - \\ &- 23,3331 \cdot 1,3355 + 34,6087 = 19,17 \text{ кВт}. \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Delta P(1,3839) &= -0,1111 \cdot 1,3839^3 + 8,4524 \cdot 1,3839^2 - \\ &- 22,7556 \cdot 1,3839 + 34,5952 = 19 \text{ кВт}. \end{aligned} \quad (11)$$

Из полученных результатов очевидно, что активная мощность, которую будет вырабатывать источник РГ для 1-го приоритетного узла, будет ниже.

Для определенной ранее активной мощности данной схемы, которую вырабатывает источник РГ, необходимо определить величину реактивной мощности, которую он будет вырабатывать. Для ее вычисления были произведены расчеты режимов работы с учетом различной величины реактивной мощности источника РГ и определены потери активной и реактивной мощностей в сети. Результаты расчетов приведены в табл. 5, на рис. 4 и рис. 5.

Таблица 5

Потери активной и реактивной мощностей в сети

Q_r , квар	0	250	500	750	1000	1250	1500
ΔP , кВт	21,5	19	18,11	18,59	20,48	23,8	28,5
ΔQ , квар	201,5	196,1	192,1	189,4	188,1	188	189,2

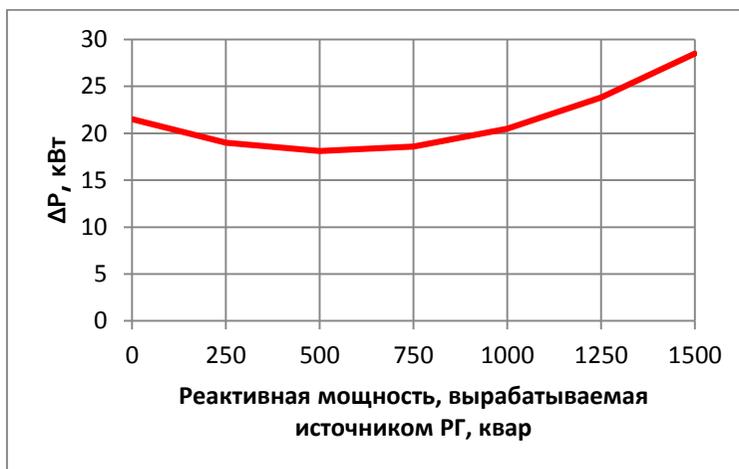


Рис. 4. Зависимость потерь активной мощности от реактивной мощности источника РГ



Рис. 5. Зависимость потерь реактивной мощности от реактивной мощности источника РГ

Так как критерием является снижение величины потерь активной мощности, то используется первая зависимость, определяется величина реактивной мощности источника РГ.

Из приведенных результатов очевидно, что минимумы функций будут достигаться при различных величинах вырабатываемой реактивной мощности. Для их нахождения необходимо подвергнуть исходную зависимость процедуре аппроксимации. Зависимость потерь активной мощности от реактивной мощности источника РГ может быть описана следующей функцией:

$$\Delta P(Q) = -0,3556 Q^3 + 12,1905 Q^2 - 12,8159 Q + 21,4857. \quad (12)$$

Найдем производную первого порядка от полученного уравнения и приравняем ее к нулю:

$$\Delta P'(Q) = -1,0668 Q^2 + 24,381 Q - 12,8159 = 0. \quad (13)$$

Тогда корни данного уравнения будут:

$$Q_1 = 22,31599 \quad Q_2 = 0,53833 \quad (14)$$

Подходящий корень уравнения Q2 – это величина мощности источника РГ в $M_{вар}$, т. е.

$$Q_{РГ}(20) = 0,53833 \text{ Мвар} = 53833 \text{ квар} \quad (15)$$

Расчетное значение потерь активной мощности:

$$\begin{aligned} \Delta P(1,2848) = & -0,3556 \cdot 0,53833^3 + 12,1905 \cdot 0,53833^2 - 12,8159 \cdot 0,53833 + \\ & + 21,4857 = 18,06384 \text{ кВт}. \end{aligned} \quad (16)$$

Зависимость потерь реактивной мощности от реактивной мощности источника РГ может быть описана следующей функцией:

$$\Delta Q(Q) = -0,3556 \cdot Q^3 + 11,3333 \cdot Q^2 - 24,4016 \cdot Q + 201,5. \quad (17)$$

Найдем производную первого порядка от полученного уравнения и приравняем ее к нулю:

$$\Delta P'(P) = -1,0668 \cdot P^2 + 22,6666 \cdot P - 24,4016 = 0. \quad (18)$$

Тогда корни данного уравнения будут:

$$Q_1 = 20,10985 \quad Q_2 = 1,13743 \quad (19)$$

Подходящий корень уравнения Q2 – это величина мощности источника РГ в $M_{вар}$, т. е.

$$Q_{РГ}(20) = 1,13743 \text{ Мвар} = 113743 \text{ квар} \quad (20)$$

Расчетное значение потерь реактивной мощности:

$$\begin{aligned} \Delta Q(1,13743) = & -0,3556 \cdot 1,13743^3 + 11,3333 \cdot 1,13743^2 - 24,4016 \cdot 1,13743 + \\ & + 201,5 = 187,884 \text{ квар}. \end{aligned} \quad (21)$$

Таким образом, при установке источника РГ в узле № 20 он будет работать со следующими параметрами: $P_r = 1053,1$ кВт, $Q_r = 538,3$ квар.

Выводы

Из анализа полученных данных следует, что при использовании критерия прироста среднего значения напряжения в сети мощность источника распределенной генерации для первого приоритетного узла будет ниже, чем в остальных узлах. Однако значение потерь активной мощности в сети может быть при этом условии не минимальным.

По критерию минимизации потерь активной мощности в сети были определены параметры активной и реактивной мощностей источника РГ. При этом потери активной мощности снизились.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Abdolreza Sadighmanesh, Kazem Zare, Mehran Sabahi.* Distributed Generation unit and Capacitor Placement for Loss Voltage profile and ATC Optimization. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 2012; 2(6): 774–780.
2. *Jahani R., Shafiqhi Malekshah A., Chahkandi Nejad H.* Applying a new advanced intelligent algorithm for optimal distributed generation location and sizing in radial distribution systems. Australian Journal of Basic and Applied Sciences. 2011; 5(5): 642–649.
3. *Borges C.L.T., Falcao D.M.* Impact of Distributed Generation Allocation and Sizing on Reliability, Losses, and Voltage Profile. IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings. Bologna. 2003.
4. *Кубарьков Ю.П., Голубева К.А.* Управление уровнем напряжения и потерь в электрических сетях с активно-адаптивными элементами // Электроэнергетика глазами молодежи: труды VI международной научно-технической конференции, 9–13 ноября 2015, Иваново. – В 2 т.
5. *Кубарьков Ю.П., Рыгалов А.Ю., Макаров Я.В., Карпов А.С.* Анализ и восстановление режимов работы систем электроснабжения с помощью мультиагентной системы // Труды Кольского научного центра РАН. – 2013. – № 4(17). – С. 112–116.
6. *Srinivasa Rao R., Ravindra K., Satish K., Narasimham S.V.L.* Power loss minimization in distribution system using network reconfiguration in the presence of distributed generation. IEEE Trans Power Syst 2012.
7. *Garcia Juan Andres Martun, Mena Antonio Jose Gil.* Optimal distributed generation location and size using a modified teaching–learning based optimization algorithm. Electr Power EnergySyst 2013; 50:65–75.
8. *Mutale J.* “Benefits of Active Management of distribution networks with distributed generation,” in Proc. Power System Conf. and Exposition, 2006, pp. 601–606.
9. *Fu-Dong L., Min W., Yong H., Xin C.* Optimal control in microgrid using multi-agent reinforcement learning, {ISA} Transactions, vol. 51, no. 6, pp. 743–751, 2012.
10. *Kumar Nunna H., Doolla S.* Multiagent-based distributed-energy-resource management for intelligent microgrids, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 60, no. 4, pp. 1678–1687, 2013.
11. *Wang Y., Ai X., Gao Y.* Microgrid's operation-management containing distributed generation system, in Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011 4th International Conference on, pp. 703–707.
12. *Chen Y.-H., Lu S.-Y., Chang Y.-R., Lee T.-T., Hu M.-C.* Economic analysis and optimal energy management models for microgrid systems: A case study in taiwan, Applied Energy, vol. 103, no. 0, pp. 145–154, 2013.
13. *Koochi-Kamali S., Tyagi V., Rahim N., Panwar N., Mokhlis H.* Emergence of energy storage technologies as the solution for reliable operation of smart power systems: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 25, no. 0, pp. 135–165, 2013.
14. *Nayeripour M., Hasanvand S., Fallahzadeh-Abarghouei H.* “Optimal Expansion Planning of Distribution System Capacity with Respect to Distributed Generations”, International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), vol. 6, no. 3, pp. 817–824, 2016.
15. *Chiandone M., Campaner R., Pavan A. Massi et al.* Impact of Distributed Generation on power losses on an actual distribution network. In: Renewable Energy Research and Application (ICRE-RA), 2014. International Conference on. IEEE, 2014. p. 1007–1011.

16. *Fallahzadeh-Abarghouei H. et al.* "Distributed Generation Planning & Grid Partitioning for Voltage Control of Smart Distribution System". *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, vol. 6, no. 4, p. 1342–1349, 2016.

Статья поступила в редакцию 4 сентября 2020 г.

OPTIMIZATION OF OPERATION MODE OF DISTRIBUTION NETWORKS WITH ACTIVE-ADAPTIVE ELEMENTS

Y.P. Kubarkov, Y.V. Makarov, K.A. Soldatkina

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *Power supply is reproduced from its own sources of electricity or from existing electrical networks. Therefore, the most important task is to develop measures to maintain the quality of electrical energy on the tires of the end user. Distributed power generation is the construction of additional sources of electricity in the immediate vicinity of consumers. Currently, the main interests of consumers are the possibility of redundancy, due to savings in reducing costs, increased efficiency of joint generation of heat and electricity. Various energy companies have begun to rely more heavily on existing support from distributed generation sources during peak loads, using these capacities to reduce losses and improve network performance. Alternative generation can be additional sources of active power. Distributed generation facilities currently account for about seven percent of the total electricity generation in Russia. This indicator is half the global scale, but distributed generation has already taken place in Russia as a phenomenon, and this industry is actively developing. Significant depreciation of fixed assets in energy complexes, high accident rates, planned and unscheduled shutdowns are among the most significant problems of the Russian energy sector. Renewable energy is an alternative energy sector based on the use of virtually inexhaustible resources for generating electricity (solar, wind, river, sea, geothermal, etc.). renewable energy has both advantages and disadvantages. Gas distributed generation is the most efficient energy technology. The popularity of distributed generation and the introduction of "smart" networks has many prerequisites. The benefits that the owner of distributed generation receives are obvious.*

Keywords: *power losses, distributed generation, voltage stability, gas distributed generation, network operation parameters, renewable energy.*

REFERENCES

1. *Abdolreza Sadighmanesh, Kazem Zare, Mehran Sabahi.* Distributed Generation unit and Capacitor Placement for Loss Voltage profile and ATC Optimization. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2012; 2(6): 774–780.
2. *Jahani R., Shafighi Malekshah A., Chahkandi Nejad H.* Applying a new advanced intelligent algorithm for optimal distributed generation location and sizing in radial distribution systems. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2011; 5(5): 642–649.

*Yury P. Kubarkov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Yaroslav V. Makarov, Senior Lecture.
Kristina A. Soldatkina, Postgraduate Student.*

3. *Borges C.L.T., Falcao D.M.* Impact of Distributed Generation Allocation and Sizing on Reliability, Losses, and Voltage Profile. IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings. Bologna. 2003.
4. *Kubar'kov Yu.P., Golubeva K.A.* Upravlenie urovnem napryazheniya i poter' v elektricheskikh setyah s aktivno-adaptivnymi elementami // Elektroenergetika glazami molodezhi: trudy VI mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, 9–13 noyabrya 2015, Ivanovo. – V 2 t.
5. *Kubar'kov Yu.P., Rygalov A.Yu., Makarov Ya.V., Karpov A.S.* Analiz i vosstanovlenie rezhimov raboty sistem elektrosnabzheniya s pomoshch'yu mul'tiagentnoj sistemy // Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. – 2013. – № 4(17). – Str. 112–116.
6. *Srinivasa Rao R., Ravindra K., Satish K., Narasimham S.V.L.* Power loss minimization in distribution system using network reconfiguration in the presence of distributed generation. IEEE Trans Power Syst 2012.
7. *Garcia Juan Andres Martin, Mena Antonio Jose Gil.* Optimal distributed generation location and size using a modified teaching–learning based optimization algorithm. Electr Power EnergySyst 2013; 50:65–75.
8. *Mutale J.* “Benefits of Active Management of distribution networks with distributed generation,” in Proc. Power System Conf. and Exposition, 2006, pp. 601–606.
9. *Fu-Dong L., Min W., Yong H., Xin C.* Optimal control in microgrid using multi-agent reinforcement learning, {ISA} Transactions, vol. 51, no. 6, pp. 743–751, 2012.
10. *Kumar Nunna H., Doolala S.* Multiagent-based distributed-energy-resource management for intelligent microgrids, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 60, no. 4, pp. 1678–1687, 2013.
11. *Wang Y., Ai X., Gao Y.* Microgrid's operation-management containing distributed generation system, in Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011 4th International Conference on, pp. 703–707.
12. *Chen Y.-H., Lu S.-Y., Chang Y.-R., Lee T.-T., Hu M.-C.* Economic analysis and optimal energy management models for microgrid systems: A case study in taiwan, Applied Energy, vol. 103, no. 0, pp. 145–154, 2013.
13. *Koohi-Kamali S., Tyagi V., Rahim N., Panwar N., Mokhlis H.* Emergence of energy storage technologies as the solution for reliable operation of smart power systems: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 25, no. 0, pp. 135–165, 2013.
14. *Nayeripour M., Hasanvand S., Fallahzadeh-Abarghouei H.* “Optimal Expansion Planning of Distribution System Capacity with Respect to Distributed Generations”, International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), vol. 6, no. 3, pp. 817–824, 2016.
15. *Chiandone M., Campaner R., Pavan A. Massi et al.* Impact of Distributed Generation on power losses on an actual distribution network. In: Renewable Energy Research and Application (ICRE-RA), 2014. International Conference on. IEEE, 2014. p. 1007–1011.
16. *Fallahzadeh-Abarghouei H. et al.* “Distributed Generation Planning & Grid Partitioning for Voltage Control of Smart Distribution System”. International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), vol. 6, no. 4, p. 1342–1349, 2016.

УДК 621.92

**СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ
ПОВОРОТНОГО СТОЛА*****В.Е. Лысов, В.А. Поляков***Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: 67lysov@mail.ru

Аннотация. *Рассматривается вопрос повышения точности воспроизведения сигнала задания поворотным столом, получивший самое широкое распространение как для работы в автономном режиме, так и в составе электромеханических комплексов, например, координатно-расточных станков. Недостаток традиционных конструкций столов – наличие люфта в подаче движения от электродвигателя к планшайбе, устройство фиксации планшайбы, что ограничивает статическую и динамическую точность в положении планшайбы и, следовательно, в обработке детали. В статье рассматривается принципиально новая конструкция стола – в виде мехатронного модуля, в котором электродвигатель и планшайба соединены без редуктора. Это позволило исключить недостатки традиционного поворотного стола и обеспечить высокую статистическую и динамическую точность в воспроизведении сигнала задания.*

Ключевые слова: *передаточная функция, поворотный стол, тепловой баланс, электродвигатель, динамическая точность, мехатронный модуль.*

В автоматизированном машиностроении для создания современных технологических машин необходимо использовать разнообразные приводные модули, к которым предъявляется комплекс жестких требований. Основными из них являются высокая точность выполнения исполнительных движений, снижение массы и габаритов, надежность в работе и большой срок службы, возможность применения оборудования в широком диапазоне температур окружающей среды, при воздействии вибраций и других возмущений или помех. Аналогичные приводные модули применяются, например, для осуществления движения разнообразных сборочных устройств, рабочих органов лазерных технологических комплексов, позиционно-слеющих устройств металлорежущих станков и механообрабатывающих роботов [1, 2]. Требования к точности, скорости и развиваемым усилиям исполнительных движений определяются особенностями технологической операции, которую требуется автоматизировать, а необходимость встраивания привода в технологическую машину требует сведения размеров привода к минимуму. При попытке синтеза модуля из серийно выпускаемых имеющихся в наличии компонентов могут быть получены технически и экономически неэффективные решения, поэтому проектирование узкоспециализированного приводного модуля, который наиболее полно отвечает предъявляемым требованиям,

Лысов Владимир Ефимович (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электропривод и промышленная автоматика».

Поляков Василий Александрович, аспирант.

часто является более целесообразным. Обеспечение компактности конструкции приводного модуля, встраиваемого в технологическую машину, имеет особое значение в ряде практических применений [3, 4].

Рассмотрим проблему повышения точности воспроизведения заданной траектории движения на примере поворотного стола. Оснащение поворотным столом металлорежущего станка, например координатно-расточного или координатно-шлифовального, позволяет выполнять многообразные операции с одной установки. Это расширяет функциональные возможности станка, позволяет повысить его производительность и точность обработки.

Существующие конструкции поворотных столов, оснащенные электроприводами подачи, имеют существенный недостаток – наличие червячного редуктора между приводным электродвигателем и планшайбой, на которой устанавливается деталь для обработки или инструмент. Редуктор для компенсации термодформаций в процессе работы стола должен иметь люфт в пределах 15 секунд [5].

Мехатронные модули являются базовыми функциональными компонентами мехатронных систем и машин с компьютерным управлением, как правило, предназначенными для выполнения движений по одной управляемой координате. Качественно новых свойств мехатронных модулей по сравнению с традиционными приводами можно достичь методом синергетической интеграции составляющих элементов.

Синергетическая интеграция представляет собой не просто объединение отдельных сегментов в систему с помощью интерфейсных блоков, а создание единого приводного модуля путем конструктивного объединения и даже взаимопроникновения составляющих элементов, часто имеющих различную физическую природу [6].

Целесообразность мехатронного подхода к проектированию приводных модулей обуславливается сложностью и противоречивостью предъявляемых к ним требований. В частности, обеспечение желаемого уровня качества модуля достигается конструктивным и функциональным взаимопроникновением его компонентов путем следования принципу синергетической интеграции элементов системы. Многие составляющие элементы модуля с учетом их последующего эффективного объединения создаются в ходе параллельного системного проектирования.

При проектировании модулей движения с применением мехатронного подхода в первую очередь необходимо определить возможные точки интеграции элементов в структуре привода. После выявления таких точек интеграции становится возможным принимать конкретные инженерные решения на проектирование и изготовление модуля движения на основе технологического и технико-экономического анализа.

Часто обеспечение компактности и надежности модуля является доминирующим требованием, которое можно реализовать путем применения бесконтактных электрических машин и внедрения информационно-измерительных элементов привода в его исполнительные элементы. Датчики при этом отдельными электромеханическими устройствами уже не являются, а становятся неотъемлемой частью исполнительного двигателя [7]. Синергетический эффект также проявляется, если за некоторыми компонентами привода закреплено выполнение нескольких функций одновременно. Применение таких решений позволяет отказаться от многих механических интерфейсов, ведет к упрощению и удешевлению конструкции, устранению необходимости механически подгонять и согласовы-

вать датчик и двигатель. Усиление значимости цифровых контроллеров приводов также рационально для повышения качества модулей в случае использования простых и недорогих аппаратных компонентов совместно с применением эффективных алгоритмов управления и обработки данных. Использование фотоимпульсных датчиков при необходимости обеспечения надежной работы привода в широком диапазоне температур невозможно в условиях возникновения вибраций и ударов [8], поэтому в качестве наиболее предпочтительных рассматриваются специально создаваемые индукционные датчики положения, в которых учитываются требования к конструктивным особенностям проектируемых приводных модулей.

На рис. 1 показана функциональная схема мехатронного модуля движения.

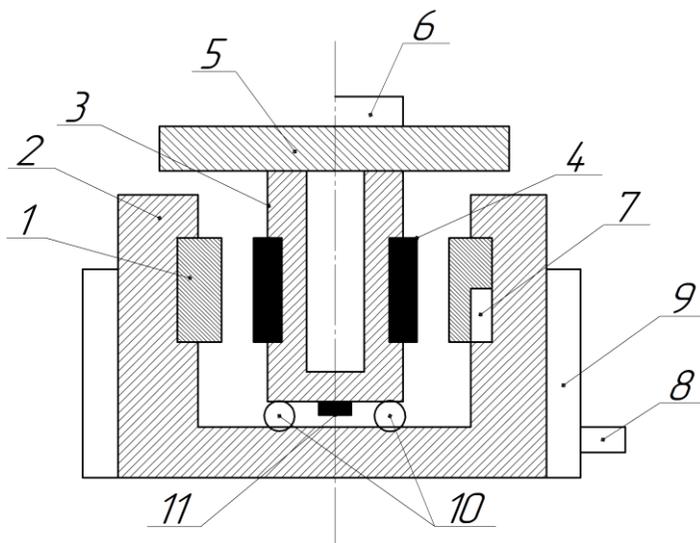


Рис. 1. Функциональная схема мехатронного модуля движения:

- 1 – обмотка статора; 2 – статор двигателя; 3 – ротор двигателя;
- 4 – постоянные магниты на роторе двигателя; 5 – планшайба;
- 6 – обрабатываемая деталь; 7 – датчики температуры;
- 8 – вход жидкости в радиатор статора; 9 – радиатор статора;
- 10 – подшипники статора; 11 – датчики параметров электродвигателя

Конструкция поворотного стола в виде мехатронного модуля, являющегося объектом системы автоматического управления, создается на основе синергетического объединения [9] электродвигателя, механического устройства в виде планшайбы и информационного устройства в виде датчиков, которые контролируют параметры движения, в одном модуле. Предлагаемый модуль может быть создан для прецизионного поворотного стола модели СК-36 на основе синхронного электродвигателя с постоянными магнитами на роторе, например 1FW6.

Чтобы представить мехатронный модуль движения в качестве объекта системы автоматического управления его позиционированием, стабилизацией или регулированием скорости при изменении программы обработки, момента удержания или сил резания в процессе позиционирования, необходимо провести его идентификацию и разработать структурную схему.

Синхронный двигатель модуля в режиме позиционирования планшайбы работает на удержание, иначе говоря, работает на упор [10]. Ток статора имеет стохастический характер и изменяется для режимов обработки изделия при враще-

нии ротора в соответствии с нагрузочной диаграммой. При таких режимах электропривода происходит нагрев статора, от него температура передается к ротору и установленной на нем планшайбе. Вследствие этого неизбежно изменение размеров планшайбы и детали, что приводит к их деформации, тем самым снижается точность обработки [11, 12].

Исследование процесса нагрева реального электродвигателя со всем многообразием сторон термического процесса связанных между собой частей, отличающихся друг от друга формой, размерами, термическими параметрами, производительностью внутренних источников тепла (патерами), описать не представляется возможным. Поэтому целесообразно пренебречь некоторыми факторами, мало влияющими на процесс. Рассмотрим термические процессы, связанные с обмоткой и пакетом железа статора. Представим электродвигатель термической моделью (рис. 2) [13].

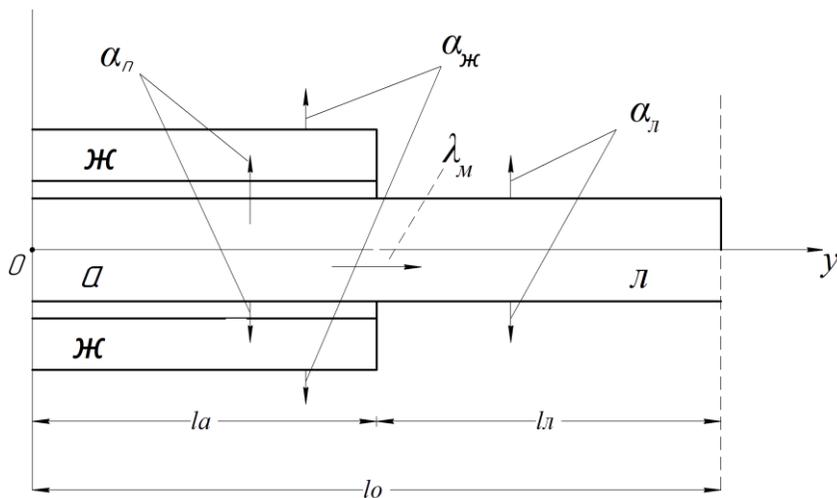


Рис. 2. Термическая модель электродвигателя:
 ж – железо статора; a – пазовая и $л$ – лобовая части обмотки;
 l_0 – длина обмотки статора; l_a – длина пакета железа

Процесс нагрева осуществляется со стороны статорной обмотки. Тепловой поток через воздушный зазор проходит к ротору и планшайбе. Ввиду того [13], что температуры нагрева, имеющие место в электрических машинах, невелики, переносом тепла лучеиспусканием можно пренебречь. Следовательно, наибольшее количество тепла отдается конвекцией и теплопроводностью. В этой связи процесс нагрева двигателя, а в конечном итоге планшайбы и детали, на ней установленной, можно оценить на основе уравнения теплового баланса:

$$\Delta P dt = A\tau \cdot dt + Cd\tau, \quad (1)$$

где ΔP – суммарные потери мощности [Вт; $\text{м}^2\text{кг}^{-3}$];
 A – теплоотдача [кал/($^{\circ}\text{C}$); Дж/($^{\circ}\text{C}$)];
 τ – превышение температуры тела над температурой окружающей среды [$^{\circ}\text{C}$];
 C – теплоемкость [кал/ $^{\circ}\text{C}$; Дж/ $^{\circ}\text{C}$].

Решение уравнения (1) [14] позволяет определить температуру нагрева электродвигателя – статора:

$$\tau = (\tau_S - \tau_F)e^{-\frac{t}{T_S}} + \tau_F, \quad (2)$$

где τ_S – начальное превышение температуры над температурой окружающей среды;

$\tau_F = \frac{\Delta P}{A}$ – установившееся значение температуры статора;

$T_S = \frac{C}{A}$ постоянная времени нагрева статора.

Если в начальный момент времени превышение температуры статора над окружающей средой равно нулю ($\tau_H = 0$), то выражение (2) преобразуется к виду

$$\tau = \tau_F(1 - e^{-\frac{t}{T_S}}). \quad (3)$$

При охлаждении до температуры окружающей среды, когда $\tau_F = 0$, получим

$$\tau = \tau_S e^{-\frac{t}{T_S}}. \quad (4)$$

Переменные потери мощности в статоре

$$\Delta P_P = 3I^2 R_S, \quad (5)$$

где I – ток статора;

R_S – активное сопротивление обмотки статора.

Потери в стали:

$$\Delta P_{St} = \Delta P_{Stn} \left(\frac{f}{f_n} \right)^q, \quad (6)$$

где P_{Stn} – номинальные потери в стали;

f, f_n – текущее и номинальное значение частоты изменения напряжения статора; $q = 1,3 \div 1,5$.

Механические потери

$$\Delta P_M = \Delta P_{Mn} \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2. \quad (7)$$

Введем обозначение $\frac{\omega}{\omega_n} = \frac{f}{f_n} = \alpha$.

Суммарные потери вычисляются как сумма зависимостей (5), (6), (7). С учетом изложенного они могут иметь вид

$$\Delta P_H = \Delta P_P + \Delta P_{Stn} \alpha^{1,5} + \Delta P_{Mn} \alpha^2. \quad (8)$$

С учетом зависимости (3) процесс нагрева статора электродвигателя можно представить в виде типового аperiodического звена:

$$W_S(p) = \frac{\tau(p)}{I(p)} = \frac{K_S}{T_S p + 1}. \quad (9)$$

Здесь K_S – коэффициент, характеризующий превышение температуры к току статора.

Нагрев планшайбы и закрепленной на ней детали происходит одновременно с процессом нагрева статора [14]. Передаточная функция процесса нагрева планшайбы в соответствии с зависимостью представляется аperiodическим звеном вида

$$W_P(p) = \frac{\tau(p)}{\tau_P(p)} = \frac{K_P}{T_P p + 1}, \quad (10)$$

где τ_p – превышение температуры планшайбы относительно окружающей среды;

K_P – коэффициент передачи, учитывающий понижение температуры планшайбы относительно температуры статора.

Вентиляция в воздушном зазоре между статором и ротором влияет на значения $K_P = (0,8 \div 0,9)K_S$ и $T_P = (1,2 \div 1,3)T_S$.

Процесс деформации детали под воздействием температуры имеет сложный характер, определяется формой и материалом детали и также может быть описан аperiodическим звеном:

$$W_0(p) = \frac{z(p)}{\tau_P(p)} = \frac{K_D}{T_D p + 1}, \quad (11)$$

где z – геометрическое изменение размеров детали в зависимости от превышения температуры детали;

K_D – коэффициент, учитывающий геометрическое изменение детали от превышения температуры над окружающей средой и определяемый в зависимости от материала обрабатываемой детали;

T_D – постоянная времени изменения размера детали.

Значение T_D находится экспериментально и по соотношению с T_P составляет $T_D = (1,1 \div 1,3)T_P$.

Синхронный двигатель с постоянными магнитами в роторе [15, 16, 17] можно представить типовым колебательным звеном:

$$W_M(p) = \frac{\omega(p)}{u(p)} = \frac{K_M}{T_E T_M p^2 + T_M p + 1}, \quad (12)$$

где $\omega(p)$ – частота вращения вала электродвигателя;

$u(p)$ – напряжение статора электродвигателя;

T_E – электромагнитная постоянная времени статора;

T_M – электромеханическая постоянная синхронного электродвигателя.

Структурная схема мехатронного модуля с учетом описания процессов работы для последующей разработки представлена на рис. 3.

Из рис. 3 следует, что объект управления является двухконтурным: первый контур формирует заданную траекторию перемещения планшайбы, второй контур стабилизирует температуру мехатронного модуля.

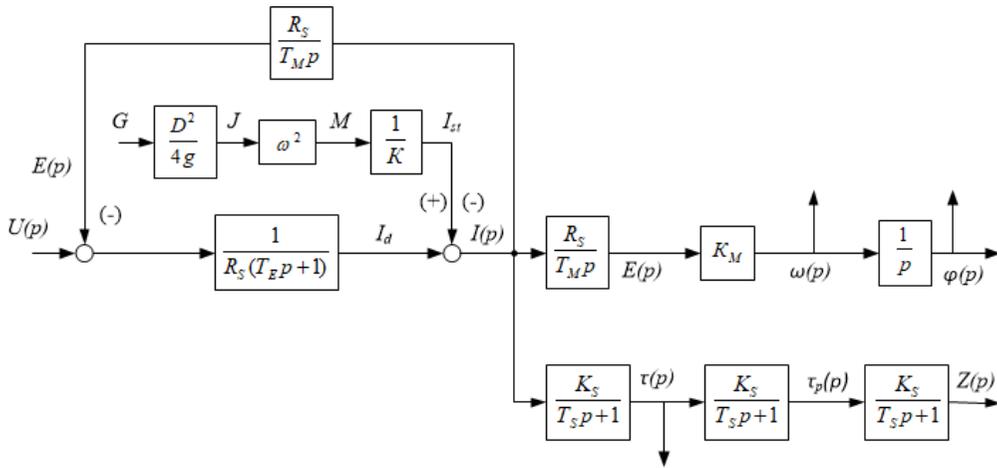


Рис. 3. Структурная схема мехатронного модуля движения

На рис. 3 показаны параметры:

G и D – вес и диаметр детали, установленной на поворотном столе;

g – ускорение свободного падения;

J – момент инерции;

ω – угловая скорость вращения планшайбы;

M – статический момент;

K – коэффициент, связывающий ток с моментом;

I_d – динамическая составляющая тока статора;

I_{st} – статическая составляющая тока статора;

$I(p)$ – изображение тока в статорной обмотке серводвигателя;

$\omega(p)$ – изображение угловой скорости вращения ротора серводвигателя (планшайбы);

$\varphi(p)$ – изображение угла поворота ротора серводвигателя (планшайбы);

$\tau(p)$ – изображение превышения температуры планшайбы относительно окружающей среды.

Упомянутыми параметрами необходимо управлять, так как они играют важную роль для реализации требований точности и производительности мехатронного модуля. Процесс нагрева имеет достаточно большие постоянные времени. Самым быстродействующим контуром является контур тока, поэтому он и задает основные требования по частоте.

В силу того, что управление поворотным столом будет осуществляться цифровой системой, целесообразно выбрать минимальную частоту квантования цифрового регулятора.

Известно [18], что передаточная функция контура тока для аналоговой системы в замкнутом виде

$$W_I(p) = \frac{1}{T^2 p^2 + 2cTp + 1}. \quad (13)$$

В (13) принято: $T^2 = \frac{T_1}{K}$, $2cT = \frac{1}{K}$,

где T_1 – постоянная времени контура тока,
 K – коэффициент передачи,

c – коэффициент демпфирования.

Амплитудно-частотная характеристика для зависимости (13) имеет вид

$$A_I(j\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1-T^2\omega^2)^2 + (2cT\omega)^2}}. \quad (14)$$

Амплитудно-частотная характеристика дискретной системы определяется смещением амплитудно-частотной характеристики аналогового прототипа на величину ω_0 и примет вид

$$A_I[j(\omega - \omega_0)] = \frac{1}{\sqrt{[1-T^2(\omega - \omega_0)^2]^2 + [2cT(\omega - \omega_0)]^2}}. \quad (15)$$

Для дискретной системы АЧХ может быть выражена в виде

$$\Delta A(e^{j\omega T}) = A_I(j\omega) + A_I[j(\omega - \omega_0)]. \quad (16)$$

При выборе величины частоты смещения характеристик необходимо выполнение того условия, что превышение их суммы по сравнению с АЧХ аналогового прототипа в области частоты пропускания ω_C линейной части системы должно быть в пределах допустимой погрешности. Последняя должна соответствовать технологическим требованиям. Величина погрешности определяется также по зависимости (14), в которой необходимо заменить погрешность $A_I(j\omega)$ на $\Delta A_I(j\omega)$ и частоту ω на ω_{01} .

Для настроенного на технический оптимум замкнутого контура положения коэффициент демпфирования $c = 0,707$. Следовательно, с учетом зависимости (14) получим

$$\Delta A_I^2(\omega_{01}) T^4 \omega_{01}^4 = 1 - \Delta A_I^2(\omega_{01}). \quad (17)$$

Из (17) выразим

$$\omega_{01} = \sqrt[4]{\frac{1 - \Delta A_I^2(\omega_{01})}{\Delta A_I^2(\omega_{01}) T^4}}, \quad (18)$$

где $\Delta A_I(\omega_{01})$ – заданное значение погрешности по отношению к аналоговому прототипу;

ω_{01} – значение частоты при максимальной частоте задающего сигнала – ω_{S_MAX} .

К значению частоты, полученному в (18), необходимо прибавить частоту полосы пропускания линейной части дискретной системы, чтобы обеспечить заданную погрешность на всем диапазоне частот сигнала задания ω_S :

$$\omega_0 = \omega_{01} + \omega_C. \quad (19)$$

Полученное значение частоты квантования ω_0 позволяет определить период дискретности экстраполятора нулевого порядка:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}. \quad (20)$$

Заключение

Рассмотрение проблемы повышения динамической точности воспроизведения сигнала задания поворотным столом, а также точности позиционирования на основе синергетической интеграции приводит к созданию единого приводного модуля путем объединения составляющих элементов и позволяет представить поворотный стол в виде мехатронного модуля.

В статье представлена термическая модель электродвигателя, на базе которого создан мехатронный модуль и проведен анализ потерь, возникающих при его работе.

Получены выражения передаточных функций процессов, имеющих место при работе мехатронного модуля.

Результаты исследования позволили разработать структурную схему мехатронного модуля, которая необходима при разработке системы автоматического управления. Получена аналитическая зависимость определения частоты квантования дискретного звена в цифровой системе управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Решетов Д.Н., Портман В.Г. Точность металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.
2. Комбаров В.В., Сорокин В.Ф. Ограничение погрешности аппроксимации криволинейных траекторий при выборе частоты цикла управления систем ЧПУ с учетом технологических параметров оборудования. Национальный аэрокосмический университет им. Жуковского Н.Е. «ХАИ» // Открытые информационные и компьютерные технологии. – 2013. – № 59. – С. 132–139.
3. Качан А.Я., Петров С.А. и др. Технология обработки моноколес высокоскоростным фрезерованием // Оборудование и инструмент. – 2006. – № 2 (75). – С. 26–32.
4. Теория автоматического регулирования. Кн. 2: Анализ и синтез линейных непрерывных и дискретных систем автоматического регулирования / Под ред. проф. В.В. Солодовникова. – М.: Машиностроение, 1967. – 679 с.
5. Аврамов А.А. Прогнозирование подачи при высокоскоростной металлообработке: пер. с англ. // Cutting Tool Engineering. – 2002. – № 3(54). – С. 40, 42–44.
6. Курносоев Е.В. Расширение функциональных возможностей высокоскоростных шпиндельных узлов // Автоматизация и современные технологии. – 2005. – № 7. – С. 3–5.
7. Klaus F. Wirtschaftlichkeitsrechnung als entschuldungshilfe für die machinencusuahe // Maschinenmarkt. – 1983/89. – № 8. – Р. 114–117.
8. Михайлов О.П., Орлова Р.Г., Пальцев А.В. Современный электропривод станков с ЧПУ и промышленных роботов / Под ред. Б.И. Черпакова. – М.: Высшая школа, 1989. – 111 с.
9. Лысов В.Е., Сидоров И.С. Анализ влияния частоты квантования цифрового регулятора положения позиционно-следящего электропривода на динамические показатели качества управления // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17. – №10. – С. 685–689.
10. Фельдлейн Е.В., Корниевич М.А. Обработка деталей на станках с ЧПУ: учеб. пособие / 3-е изд., доп. – Минск: Новое знание, 2008. – 229 с.
11. Лебедев А.М. Следящие электроприводы станков с ЧПУ. – Энергоиздат, 1988. – 223 с.
12. Анушин А.С. Системы управления электроприводов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2015. – 373 с.
13. Козьминых Д.В. Расчет мощности электроприводов с учетом старения изоляции. – Куйбышев: Куйбышевское книжное издательство, 1960. – 67 с.
14. Андреев В.П., Сабинин Ю.А. Основы электропривода. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 772 с.
15. Лысов В.Е., Саранцев С.С. Синтез корректирующего звена следящего электропривода подачи координатно-расточного станка для компенсации нелинейности типа «люфт» в кинематической цепи // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2012. – № 1(32). – С. 148–156.
16. Терехов В.М. Дискретные и непрерывные системы управления в электроприводах: учеб. пособие по курсу «Системы управления электроприводами». – М.: МЭИ, 1989. – 80 с.
17. Лысов В.Е., Сидоров И.С. Анализ погрешности в воспроизведении заданной траектории движения позиционно-следящего электропривода с учетом дискретности экстраполятора нулево-

го порядка // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2015. – № 3(47). – С. 142–148.

18. *Лысов В.Е.* Теория автоматического управления: учеб. пособие. – М.: Машиностроение, 2010. – 500 с.

Статья поступила в редакцию 1 октября 2020 г.

STRUCTURAL AND PARAMETRIC IDENTIFICATION OF THE CIRCULAR TRANSFER TABLE

V.E. Lysov, V.A. Polyakov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: 67lysov@mail.ru

Abstract. *The paper discusses the issue of improving the accuracy of reproducing the task signal by a circular transfer table, which is most widely used both for autonomous operation and as part of electromechanical systems, for example, coordinate boring machines. The disadvantage of traditional table designs is the presence of backlash in the supply of motion from the electric motor to the faceplate, the faceplate fixing devices, that limits the static and dynamic accuracy in the faceplate position and, consequently, in the processing of the part. The paper discusses a fundamentally new design of the table - in the form of a mechatronic module, which has the electric motor and faceplate connected without a gearbox. This made it possible to eliminate the disadvantages of the traditional transfer table and ensure high statistical and dynamic accuracy in reproducing the task signal.*

Keywords: *transfer function, circular transfer table, thermal balance, electric motor, dynamic precision, mechatronic module.*

REFERENCES

1. Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya. Kn. 2: Analiz i sintez lineynykh nepreryvnykh i diskretnykh sistem avtomaticheskogo regulirovaniya / Pod red. prof. V.V. Solodovnikova. – М.: Mashinostroyeniye, 1967. – 679 s.
2. *Kombarov V.V., Sorokin V.F.* Ogranicheniye pogreshnosti approksimatsii krivolineynykh trayektoriy pri vybore chastoty tsikla upravleniya system CHPU s uchotom tekhnologicheskikh parametrov oborudovaniya. Natsional'nyy aerokosmicheskiy universitet im. Zhukovskogo N.Ye. «KHAI» // Otkrytyye informatsionnyye i komp'yuternyye tekhnologii. – 2013. – № 59. – S. 132–139.
3. *Kachan A.Ya., Petrov S.A. i dr.* Tekhnologiya obrabotki monokolos vysokoskorostnym trezerovaniyem // Oborudovaniye i instrument. – 2006. – № 2 (75). – S. 26–32.
4. *Reshetov D.N., Portman V.G.* Tochnost' metallovezhushchikh stankov. – М.: Mashinostroyeniye, 1986. – 336 s.
5. *Avramov A.A.* Prognozirovaniye – podachi pri vysokoskorostnoy metalloobrabotke / per. s angl. // Cutting Tool Engineering. – 2002. – № 3 (54). – S. 40, 42–44.
6. *Kurnosov Ye.V.* Rasshireniye funktsional'nykh vozmozhnostey vysokoskorostnykh shpindel'nykh uzlov // Avtomatizatsiya i sovremennyye tekhnologii. – 2005. – № 7. – S. 3–5.
7. *Klaus F.* Wirtshaftlichkeitsrechnung als entschudungshilfe fur di machinencusuahe // Maschinenmarkt. – 1983/89. – № 8. – P. 114–117.

*Vladimir E. Lysov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Vasily A. Polyakov, Postgraduate Student.*

8. *Mikhaylov O.P., Orlova R.G., Pal'tsev A.V.* Sovremennyy elektroprivod stankov s CHPU i promyshlennykh robotov / pod redaktsiyey B.I. Cherpakova. – M.: Vysshaya shkola, 1989. – 111 s.
9. *Lysov V.Ye., Sidorov I.S.* Analiz vliyaniya chastoty kvantovaniya tsifrovogo regul'yatora polozheniya pozitsionno-sledyashchego elektroprivoda na dinamicheskiye pokazateli kachestva upravleniya // Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye. – 2016. – T. 17. – № 10. – S. 685–689.
10. *Fel'dshteyn Ye.V., Korniyevich M.A.* Obrabotka detaley na stankakh s CHPU: ucheb. posobiye / 3-ye izd., dop. – Minsk: Novoye znaniye, 2008. – 229 s.
11. *Lebedev A.M.* Sledyashchiye elektroprivody stankov s CHPU. – Energoizdat, 1988. – 223 s.
12. *Anuchin A.S.* Sistemy upravleniya elektroprivodov. – M.: Izd. dom MEI, 2015. – 373 s.
13. *Koz'minykh D.V.* Raschet moshchnosti elektroprivodov s uchedom stareniya bzolyatsii. – Kuybyshevskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1960. – 67 s.
14. *Andreev V.P., Sabinin Yu.A.* Osnovy elektroprivoda. – M.–L.: Gosenergoizdat, 1963. – 722 s.
15. *Lysov V.Ye., Sarantsev S.S.* Sintez korrektiruyushchego zvena sledyashchego elektroprivoda podachi koordinatno-rastochnogo stankadlya kompensatsii nelineynosti tipa «lyuft» v kinematicheskoy tsepi // Vestnik SamGTU. Seriya «Tekhnicheskkiye nauki». – 2012. – № 1(32). – S. 148–156.
16. *Terekhov V.M.* Diskretnyye i nepreryvnyye sistemy upravleniya v elektroprivodakh: ucheb. posobiye po kursu «Sistemy upravleniya elektroprivodami». – M.: MEI, 1989. – 80 s.
17. *Lysov V.Ye., Sidorov I.S.* Analiz pogreshnosti v vosproizvedenii zadannoy trayektorii dvizheniya pozitsionno-sledyashchego elektroprivoda s uchotom diskretnosti ckstrapol'yatora nulevogo poryadka // Vestnik SamGTU. Seriya «Tekhnicheskkiye nauki». – 2015. – № 3 (47). – S. 142–148.
18. *Lysov V.Ye.* Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: ucheb. posobiye. – M.: Mashinostroyeniye, 2010. – 500 s.

УДК 621.313

КОМБИНИРОВАННЫЙ МАГНИТНЫЙ ПОДВЕС**Ю.А. Макаричев, Ю.Н. Иванников, Я.А. Ратцев, Е.А. Полянский**Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. *Повышение энергоэффективности и снижение массогабаритных показателей активных магнитных подшипников – актуальная задача, решение которой позволит повысить конкурентоспособность магнитного подвеса. Использование энергии постоянных магнитов на основе редкоземельных металлов является перспективным направлением совершенствования магнитных подшипников. В статье изложены некоторые вопросы интеграции высококоэрцитивных постоянных магнитов в магнитную систему радиального электромагнитного подвеса. Рассмотрена упрощенная математическая модель и предложен подход к расчету габаритных размеров полюсов с закладными магнитами и управляющих полюсов. По приведенной методике рассчитана геометрия комбинированного магнитного подвеса. Методом численного моделирования уточнено магнитное состояние исследуемых машин, получены тяговые характеристики традиционного и комбинированного магнитного подшипника. Установлено, что в заданных габаритах возможно размещение постоянных магнитов, необходимых для компенсации основной возмущающей силы – веса ротора, что позволяет снизить токи обмоток электромагнитов и повысить энергоэффективность подвеса за счет снижения потерь в меди. Это в итоге позволит уменьшить стоимость системы управления подвесом и емкость резервных аккумуляторных батарей. Использование постоянных магнитов существенно влияет на эксплуатационные качества подвеса и смещает рабочую точку на тяговой характеристике подшипника, компенсирующего вес ротора, в область средних значений. В тепловом отношении все катушки электромагнитов оказываются нагруженными более равномерно. Рассмотренные особенности гибридного магнитного подвеса положительно влияют на динамические характеристики системы управления.*

Ключевые слова: *активный электромагнитный подшипник, магнитный подвес, энергоэффективность, постоянные магниты, тяговая характеристика, магнитное поле.*

Актуальность вопроса

Активный электромагнитный подшипник (АЭМП) благодаря своим преимуществам находит применение в ряде наукоемких областей промышленности [1, 2]. Наиболее перспективно применение АЭМП в качестве опор высокоскоростных вращающихся машин или машин, работающих в условиях глубокого вакуума. Магнитный подвес находит свое применение в трубопроводном транспорте в качестве опор нагнетателей газоперекачивающих агрегатов (ГПА). Заме-

Макаричев Юрий Александрович (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Электро-механика и автомобильное оборудование».

Иванников Юрий Николаевич (к.т.н.), доцент кафедры «Электро-механика и автомобильное оборудование».

Ратцев Ярослав Алексеевич, магистрант.

Полянский Евгений Анатольевич, аспирант.

на гидродинамических масляных подшипниках нагнетателя магнитным подвесом обуславливается существенным экономическим эффектом [3]. В результате парк ГПА на объектах ПАО «Газпром» с АЭМП в качестве опор в последнее время стабильно расширяется [4]. Отметим, что технология АЭМП обладает экологической чистотой [2, 5], что становится существенным преимуществом и согласуется с вектором технологического развития, направленным на снижение антропогенного воздействия на окружающую среду.

Основными факторами, сдерживающими распространение АЭМП, являются большие массогабаритные показатели по сравнению с традиционными подшипниками и необходимость в стороннем источнике электрической энергии [2, 3, 5]. Одним из направлений совершенствования АЭМП является повышение его энергоэффективности за счет снижения основных потерь, в результате чего может быть достигнуто снижение удельного энергопотребления и в итоге – улучшение массогабаритных параметров. Исследования энергетических процессов магнитного подвеса показывают, что основные потери АЭМП приходятся на потери в стали ротора при вращении его в магнитном поле электромагнитов, потери в меди и аэродинамические потери [6]. Снижение потерь в катушках возможно за счет использования энергии постоянных магнитов (ПМ). Рассмотрим традиционную компоновку радиального АЭМП.

Комплект АЭМП состоит, как правило, из двух радиальных, одного осевого электромагнитного подшипника и системы управления магнитным подвесом (СУМП). Радиальные подшипники ограничивают перемещения ротора в радиальном направлении, а осевой – в аксиальном. Конструкции радиальных АЭМП различаются по числу полюсов (зубцов) магнитной системы статора. В опорах нагнетателей отечественных производителей применяются в основном конструкции электромагнитных подшипников с магнитной системой с сосредоточенными катушками с числом зубцов статора, равным $Z = 8$ (рис. 1), а также с числом зубцов $Z = 12$ и $Z = 16$ [7].

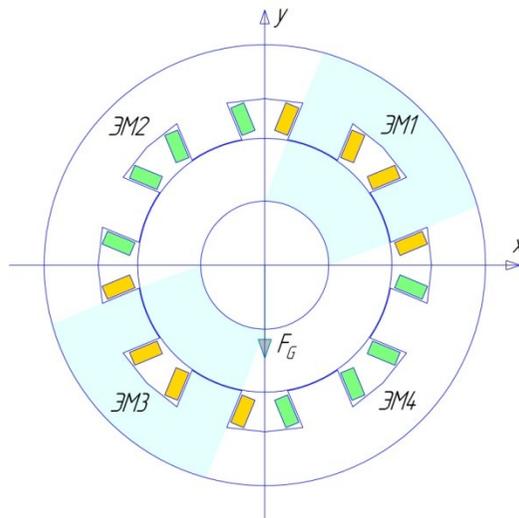


Рис. 1. Радиальный активный электромагнитный подшипник

На рис. 1 F_G – вес ротора, основная возмущающая сила, действующая на ротор АЭМП; ЭМ1, ЭМ2, ЭМ3 и ЭМ4 – независимые электромагниты, управляемые посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ) системы управления магнитным подвесом. Обычно оси электромагнитов смещены в пространстве та-

ким образом, чтобы распределить вес ротора между двумя соседними электромагнитами (ЭМ1 и ЭМ2). Электромагниты, лежащие на одной оси (например ЭМ1 и ЭМ3), объединяются в один канал управления.

Существует несколько законов управления электромагнитами радиального АЭМП. Наибольшее распространение получили СУМП, основанные на алгоритме с токами смещения и дифференциальном законе управления. В [5] рассматривается дифференциальный закон управления, который был принят за основу при моделировании электромагнитных процессов радиального АЭМП. Суть процесса регулирования напряжения на катушках электромагнитов одного канала заключается в следующем: скважность сигнала ШИМ на обмотке ЭМ1 (k_1) связана со скважностью ЭМ3 (k_3) соотношением

$$k_1 = 1 - k_3. \quad (1)$$

Аналогично и для другой пары электромагнитов. Величина токов одного канала управления:

$$\begin{cases} I_1 = I_{\max} \cdot k; \\ I_3 = I_{\max} \cdot (1 - k), \end{cases} \quad (2)$$

где k принимает значения от 0 до 1;

I_{\max} – максимальная величина токов электромагнитов.

При увеличении скважности k усилие, создаваемое ЭМ1, увеличивается, а ЭМ3, соответственно, уменьшается, поэтому с изменением k суммарное усилие, создаваемое парой магнитов, изменяется линейно. Токи катушек ЭМ2 и ЭМ4 изменяются по аналогичному закону.

Использование энергии постоянных магнитов (ПМ) для возбуждения основного магнитного потока в электрических машинах является перспективным направлением повышения их энергоэффективности и надежности [8]. Конструкции и расчет традиционных электродвигателей и генераторов с возбуждением от ПМ хорошо известны [8, 9, 10]. Широкое распространение магнитных сплавов на основе редкоземельных металлов, обладающих высокой удельной магнитной энергией, позволило расширить области применения ПМ в электрических машинах.

Перспективной альтернативой рассмотренной конструкции магнитного подвеса являются гибридные АЭМП, в которых постоянная составляющая нагрузки компенсируется энергией постоянных магнитов. Конструкции таких комбинированных электромагнитных подвесов известны давно [10, 11], тем не менее данное направление совершенствования АЭМП продолжает развиваться [12, 13, 14].

Очевидны потенциальные преимущества от использования энергии постоянных магнитов для полной компенсации веса ротора: достаточно значительное снижение потребляемой от СУМП мощности; удешевление СУМП за счет снижения величины коммутируемого тока; снижение емкости резервных аккумуляторных батарей и (или) продление времени автономной работы при той же емкости.

Целью данной статьи является сравнение характеристик традиционного и гибридного (с компенсированием веса ротора энергией ПМ) АЭМП, оценка влияния ПМ на тяговые характеристики магнитного подвеса.

Интеграция постоянных магнитов в радиальный АЭМП

В [12] подробно рассмотрена конструкция магнитного подвеса с подпиткой от ПМ. Однако данная конструкция существенно отличается от АЭМП, используемых на компрессорных станциях РФ, что существенно влияет на параметры системы управления. Для минимизации вносимых изменений в существующую СУМП в настоящей статье рассматривается интеграция постоянных магнитов в магнитную систему радиального АЭМП производства корпорации ФГУП «НПО ВНИИЭМ».

За основу принят радиальный АЭМП с номинальной тяговой силой $F_{nom} = 13,6$ кН, эксплуатируемый на рабочих установках ГПА. Основным направлением исследования являлась интеграция постоянных магнитов в конструкцию АЭМП в прежних габаритах. Исходными данными для реализации конструкции АЭМП с постоянными магнитами были: номинальная подъемная сила, коэффициент перегрузочной способности ($k_{o.c}$), диаметр расточки статора (D_c), осевая длина (L_a), число пар полюсов (p), номинальная величина воздушного зазора (δ_{nom}) и величина воздушного зазора в страховочных подшипниках ($\delta_{a.b}$).

При проектировании перегрузочная способность АЭМП, как правило, принимается равной [15] $k_{o.c} = 1,5$. Целесообразно проектировать комбинированный магнитный подвес таким образом, чтобы вес ротора компенсировался энергией постоянных магнитов, а запас по тяговой силе обеспечивался управляемыми полюсами. В результате полюса управления в максимальном режиме должны развивать силу, равную

$$F_c = (k_{o.c} - 1) \cdot F_{nom} \quad (3)$$

Магнитный подвес должен обеспечивать запас по тяговому усилию для отклонения ротора от положения равновесия во всем рабочем диапазоне. Максимальная допустимая амплитуда колебаний оси ротора не должна выходить за границу зон В/С вибрационного состояния машины в соответствии со стандартом ГОСТ Р ИСО 14839-2-2011. Следовательно, максимальный рабочий зазор

$$\delta_{max} = \delta_{nom} + 0,4 \cdot \delta_{a.b} \quad (4)$$

В воздушном зазоре АЭМП сосредоточена практически вся энергия магнитного поля машины. Поэтому имеет смысл вести расчет магнитного подвеса относительно длины воздушного зазора под полюсом по расточке статора.

В исходной модели пара полюсов занимает угол, равный (рад)

$$\Delta\varphi_p = \frac{2\pi}{p}$$

При этом часть этого угла, занятая зубцом, характеризуется коэффициентом полюсного перекрытия

$$\alpha = \frac{b_n}{\tau}$$

где b_n – ширина полюса;
 τ – полюсное деление.

Для явнополюсных конструкций (см. рис. 1) величина полюсного перекрытия варьируется в достаточно узком диапазоне $\alpha \in (0,5; 0,6)$ [15]. Таким образом, только половина зазора по расточке статора участвует в создании тяговой силы, оставшаяся часть занята катушками либо свободна от активных материалов.

Длина дуги воздушного зазора, занимаемая управляющими полюсами, может быть предварительно рассчитана на основании требуемой ширины полюсов, катушек и технологических зазоров. Основные геометрические размеры П-образной и Ш-образной конструкций представлены на рис. 2.

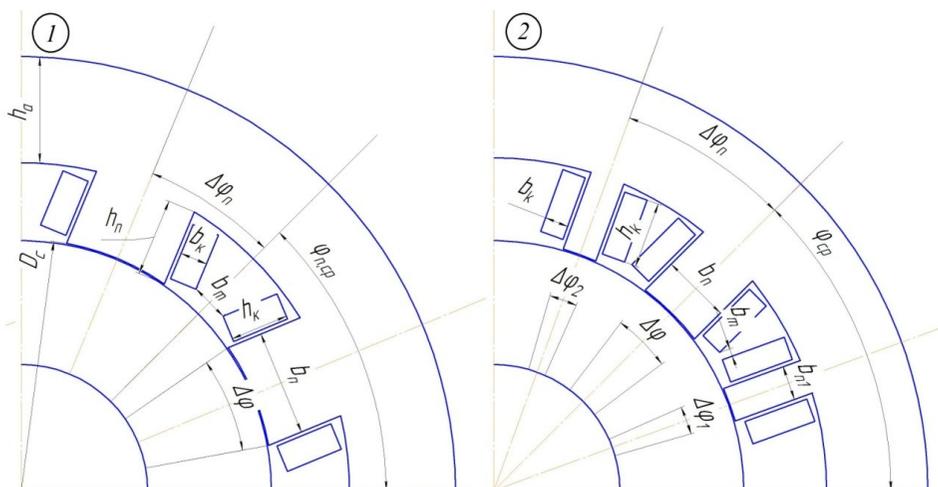


Рис. 2. Размеры геометрической модели П-образного (1) и Ш-образного (2) электромагнитов АЭМП

Электромагнитное усилие, развиваемое плоскопараллельным магнитным полем, определяется по закону Максвелла. Тяговая сила полюса после некоторых преобразований может быть записана относительно угла по расточке статора:

$$F_n = \frac{B_\delta^2 \cdot L_a \cdot D_c \cdot \Delta\varphi}{4 \cdot \mu_0}, \quad (5)$$

где $\Delta\varphi$ – угол полюсной дуги (см. рис. 2);
 μ_0 – магнитная проницаемость вакуума;
 B_δ – магнитная индукция в зазоре.

Проекции электромагнитного усилия (5) на ортогональные оси:

$$\begin{cases} F_{n,x} = F_n \cdot \cos(\varphi), \\ F_{n,y} = F_n \cdot \sin(\varphi). \end{cases}$$

Как правило, электромагниты АЭМП располагаются в пространстве, как показано на рис. 1. Тогда проекция тяговой силы, создаваемой П-образным электромагнитом на ось y (см. рис. 2 (1)):

$$F_{n,y} = F_n \cdot \sin(\varphi_{cp} + \Delta\varphi_n) + F_n \cdot \sin(\varphi_{cp} - \Delta\varphi_n). \quad (6)$$

Тогда требуемый угол для создания тяговой силы F_{2n} из (5) и (6) для П-образного магнита

$$\Delta\varphi = \frac{2 \cdot F_{2n} \cdot \mu_0 \cdot k_\beta^2}{D_c \cdot L_a \cdot B_\delta^2 \cdot \sin(\varphi_{cp}) \cdot \cos(\Delta\varphi_n)}, \quad (7)$$

где k_β – коэффициент индукции – отношение магнитной индукции в зубце к индукции в зазоре;

φ_{cp} – угол оси симметрии электромагнита (см. рис. 2), обычно 45° ;

$\Delta\varphi_n$ – угол, который занимает половина полюса электромагнита:

$$\Delta\varphi_n = \frac{\Delta\phi_m}{2} + \Delta\phi_k + \frac{\Delta\phi}{2} \approx \frac{\arcsin\left(\frac{b_m}{D_c}\right)}{2} + \arcsin\left(\frac{b_k}{D_c}\right) + \frac{\pi \cdot \alpha}{p};$$

b_m – расстояние между катушками в самом узком месте;

b_k – ширина катушки.

Для рассматриваемой конструкции с $p = 4$ аргумент косинуса в уравнении (7) – величина относительно небольшая, так что $\cos(\Delta\varphi_n) \approx 0,95$.

С увеличением числа полюсов или уменьшением ширины полюса $\cos(\Delta\varphi_n) \rightarrow 1$.

Наибольшее распространение получают конструкции с $p = 4; 6; 8$ [7]. Поэтому косинус в левой части уравнения (7) с достаточной степенью точности может быть заменен на коэффициент, равный $k_{\cos} = 0,95$, и уравнение (7) преобразуется:

$$\Delta\varphi = \frac{2 \cdot F_{2n} \cdot \mu_0 \cdot k_\beta^2}{k_{\cos} \cdot D_c \cdot L_a \cdot B_\delta^2 \cdot \sin(\varphi_{cp})}. \quad (8)$$

Тогда угол, который занимает электромагнит радиального АЭМП (пара полюсов):

$$\Delta\varphi_{e.m} \approx 4 \cdot \left(\arcsin\left(\frac{b_m}{D_c}\right) + \arcsin\left(\frac{b_k}{D_c}\right) + \Delta\varphi \right).$$

Ширина катушки, если известна ее высота или высота полюса:

$$b_k = \frac{S_k}{h_k}, \quad (9)$$

где площадь поперечного сечения катушки

$$S_k = \frac{Iw}{j \cdot k_3}, \quad (10)$$

где j – плотность тока в проводнике;

k_3 – коэффициент заполнения сечения катушки медью;

Iw – намагничивающая сила (НС) полюса (полное число ампервитков катушки):

$$Iw = \frac{B_\delta \cdot \delta_{p,\max} \cdot k_\mu}{\mu_0}, \quad (11)$$

где k_μ – коэффициент насыщения магнитной цепи.

Выполнив аналогичные расчеты, получим требуемую ширину полюса для Ш-образного электромагнита:

$$\begin{cases} \Delta\phi_1 = \frac{2 \cdot F_{2n} \cdot \mu_0 \cdot k_{\beta}^2}{D_c \cdot L_a \cdot B_{\delta}^2 \cdot \sin(\phi_{cp}) \cdot (1 + \cos(\Delta\phi_n))}; \\ \Delta\phi = \Delta\phi_1 + \Delta\phi_2 = 2 \cdot \Delta\phi_1. \end{cases} \quad (12)$$

Магнитный поток Ш-образного электромагнита, протекающий по среднему зубцу, разветвляется на две составляющие, замыкаясь через крайние зубцы. Второе уравнение в (12) обеспечивает идентичность магнитных состояний зубцов электромагнита.

Таким образом, для обеспечения полюсами управления тяговой силы по (3) в заданных габаритах один (из четырех) электромагнит займет угол $\Delta\varphi_{em} = 36^\circ$, оставляя 54° на полюса с возбуждением потока от постоянных магнитов на сегмент в четверть окружности по расточке статора.

За счет уменьшения ширины полюса при прежних обмоточных данных уменьшается сопротивление катушки и, следовательно, значение необходимого питающего напряжения. Для сохранения номинального напряжения обмоточные данные были пересчитаны. В основе расчета использовались зависимости (9)–(11). В условиях ранее принятых допущений о неизменности габаритных размеров сохранялась прежняя высота катушки.

Важной частью реализации магнитного подвеса с постоянными магнитами является геометрическое расположение ПМ. Постоянные магниты в объеме статора должны располагаться таким образом, чтобы по возможности увеличить заполнение активными материалами объема статора АЭМП. В данной работе рассматривалась простейшая конструкция АЭМП с ПМ (рис. 3).

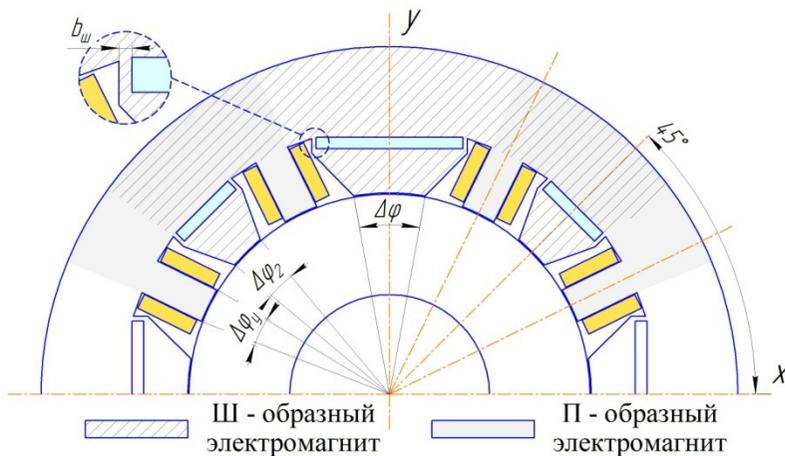


Рис. 3. Радиальный АЭМП с постоянными магнитами

Статическая составляющая нагрузки радиального АЭМП на рис. 3 компенсируется энергией постоянных магнитов, интегрированных в магнитопровод статора в форме Ш-образного магнита. Требуемая ширина полюсов была определена по (12), после чего с учетом (3) по (7) была определена ширина полюсов управления. Магнитная индукция в зазоре под полюсами ПМ принималась равной ($T_{л}$)

$$B_{PM} = 1,6,$$

что соответствует границе насыщения для стали 2421. Индукция в зазоре под полюсами управления (T_n)

$$B_c = 1,4$$

выбрана ниже, так как в процессе управления даже в самых тяжелых условиях сталь не должна входить в насыщение из-за вероятности потери управляемости магнитным подвесом.

Расположение постоянных магнитов в рассматриваемой конструкции предполагает наличие мостиков насыщения шириной b_{bs} , назначение которых – передача механической нагрузки от полюса станине. Подобные технические решения широко используются в конструкции, например, синхронных машин с постоянными магнитами. Известны [9, 16] так называемые *IPM (Interior Permanent Magnet)* конструкции ротора, или конструкции с закладными магнитами. Преимущество такой конструкции состоит в технологичности производства магнитопровода и установки ПМ. Для уменьшения коэффициента рассеяния ПМ ширина b_{bs} должна быть минимально возможной. С другой стороны, величина b_{bs} должна быть достаточной для выполнения условий прочности и технологических ограничений. От величины b_{bs} зависит безопасность подвеса, поэтому необходим точный механический расчет и большой запас по механической прочности мостиков насыщения. При численном моделировании было принято $b_{bs} = 3$ мм.

В качестве постоянных магнитов были выбраны высококоэрцитивные материалы на основе *Nd-Fe-B*. Остаточная индукция (B_r) большинства этих ПМ ниже принятой ранее магнитной индукции в зазоре под полюсом. Для эффективного использования материалов ПМ выгодно проектировать магнитные цепи так, чтобы рабочая точка на кривой размагничивания ПМ соответствовала максимуму энергии. Кроме того, необходимо учитывать снижение полезного потока за счет его рассеяния в мостиках насыщения (b_{bs}). Требуемая индукция в зазоре может быть обеспечена за счет придания полюсу трапецевидной формы, обращенной меньшим основанием к зазору (см. рис. 3) [13].

Для уточнения тяговых характеристик проведено численное моделирование в двумерной постановке с использованием специализированного программного обеспечения. Созданы геометрические модели радиального АЭМП (см. рис. 1 и рис. 3).

Основой математического моделирования электромагнитных полей является система уравнений Максвелла. Формулировка задачи стационарного магнитного поля относительного векторного магнитного потенциала в двумерной постановке имеет вид [17]

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \operatorname{rot} \mathbf{A}_z(x, y) \right) = \mathbf{J}_z(x, y) + \operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \mathbf{B}_r \right), \quad (13)$$

где \mathbf{A}_z – векторный магнитный потенциал;

μ – тензор магнитной проницаемости;

\mathbf{J}_z – плотность тока возбуждения;

\mathbf{B}_r – вектор индукции остаточной намагниченности.

При моделировании расчетная область разбивалась на блоки, соответствующие магнитопроводам статора и ротора, катушкам электромагнитов и воздушному пространству. Векторный магнитный потенциал на границе расчетной области был принят равным нулю $A_b = 0$ (первое граничное условие). В качестве источников магнитного поля задавался полный ток катушек, рассчитанный по (2).

Магнитные свойства сердечников статора и ротора численной модели соответствуют свойствам листовой электротехнической стали марки 2412 и 2421 соответственно. Модель включает блоки постоянных магнитов на основе материалов *NdFeB* марки *N48*, для которых была задана кривая размагничивания, соответствующая рабочей температуре магнитов (принята равной $T_{\text{раб}} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$). Остаточная индукция ПМ *N48* $B_r = 1,36 \text{ Тл}$, коэрцитивная сила по индукции $H_c = 836 \text{ кА/м}$. Результаты моделирования представлены на рис. 4 и 5.

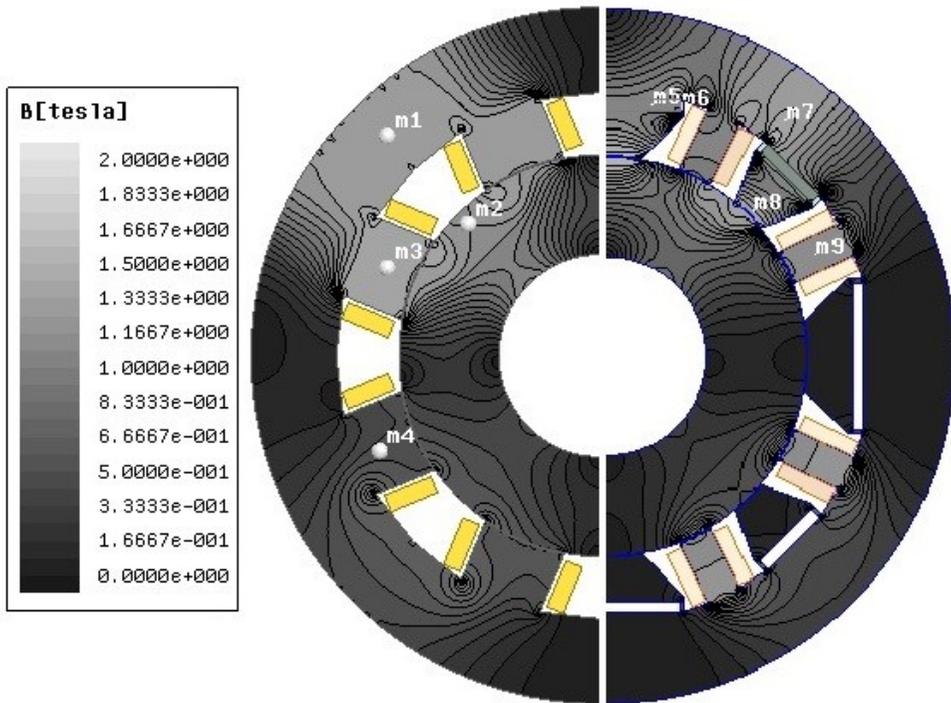


Рис. 4. Картина магнитного поля радиального АЭМП

Магнитная индукция в некоторых частях радиального АЭМП

Метка	m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8	m9
Магнитная индукция, Тл	1,36	1,25	1,47	0,54	1,1	2,1	1,43	1,42	1,1

Картина магнитного поля соответствует случаю, когда радиальный АЭМП развивает номинальную тяговую силу. На рис. 4 и в таблице представлена магнитная индукция в ключевых точках машины. Для сравнения представлены две конструкции радиального АЭМП: исходная и конструкция с закладными магнитами. Магнитное состояние подшипника, рассчитанного по методике, представленной выше, соответствует ожиданию. Магнитная индукция в теле магнита $B_m = 1,1 \text{ Тл}$, в зазоре под полюсами ПМ $B_p = 1,6 \text{ Тл}$, индукция в зубцах управляющих полюсов $B_{c,l} = 1,1 \text{ Тл}$ в «верхних» полюсах и $B_{c,u} = 1,26 \text{ Тл}$ в «нижних» соответствует линейному участку кривой намагничивания стали 2412. Наиболее «узким» местом конструкции с ПМ в отношении магнитного состояния оказалось ярмо на участке между полюсами ПМ: $B_{bp} = 1,48 \text{ Тл}$, что соответствует ко-

лену на кривой намагничивания, что связано со спецификой рассматриваемой конструкции: магнитные потоки управляющих полюсов и полюсов ПМ в этом месте складываются. Индукция в технологических мостиках превышает $B_{bs} > 2$ Тл, что соответствует глубокому насыщению используемой стали. Коэффициент рассеяния ПМ большого и малых полюсов соответственно при рассчитанных габаритах определялся отношением потока в среднем сечении магнита к потоку в зазоре:

$$\begin{cases} k_{\sigma} = \frac{\Phi_m}{\Phi_{\delta}} = 1,37; \\ k_{\sigma 1} = k_{\sigma 2} = 1,66. \end{cases}$$

Так как модель строилась по упрощенной методике, то величина b_{bs} принималась одинаковой для всех полюсов, поэтому за счет меньшей ширины малых полюсов коэффициент рассеяния значительно выше. Величина коэффициентов рассеяния достаточно близка к аналогичным коэффициентам для ротора синхронных машин *IPM*. Отметим, что постановка задачи не учитывает торцевые потоки рассеяния.

На рис. 5 представлено семейство тяговых характеристик в исходной конструкции и в конструкции с ПМ.

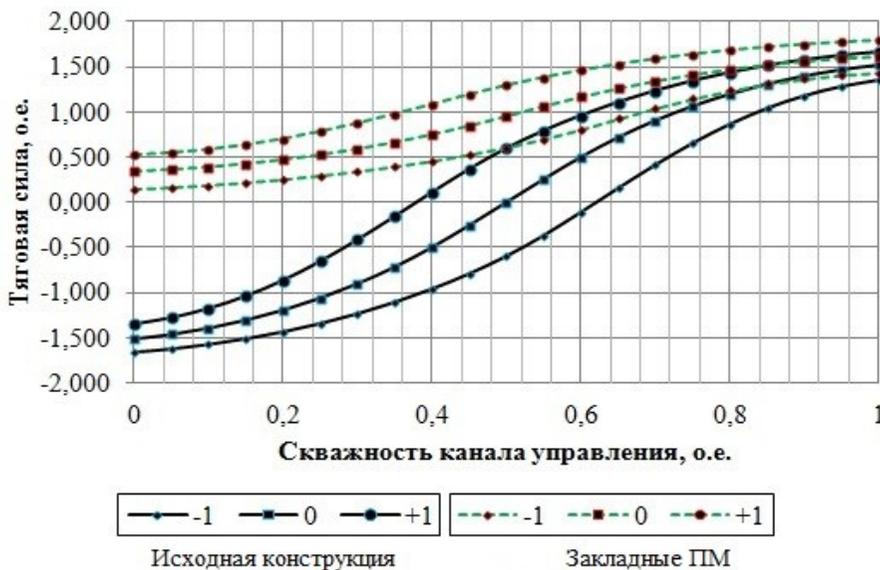


Рис. 5. Тяговые характеристики радиального АЭМП (моделирование)

Тяговые характеристики получены при разном отклонении ротора по оси y (см. рис. 1 и рис. 3): 0 – центральное положение; ± 1 – максимально возможное рабочее отклонение ротора по (4). Так как исходная конструкция является симметричной, то и изменение тяговой силы происходит во всем диапазоне $\pm k_n F_{nom}$ как по оси y , так и по оси x . Отметим, что за счет постоянной составляющей возмущающей силы рабочий диапазон смещен относительно точки симметрии ($k = 0,5$) в область $k_{nom} \approx 0,74$, а рабочий диапазон $k \in (0,5; 1)$, в результате чего часть характеристики при $k < 0,5$ оказывается не задействованной во всем диапа-

зоне работы. По оси x нет постоянной возмущающей силы, из-за чего максимальная тяговая сила электромагнитов оказывается избыточной.

За счет компенсации веса ротора энергией постоянных магнитов тяговая характеристика расположена в диапазоне $\pm(k_n - 1)F_{nom}$ по осям x и y . Рабочая точка совпадает с точкой симметрии зависимости ($k = 0,5$) и располагается на линейной части характеристики. В конструкции с ПМ регулирование тяговой силы возможно во всем диапазоне $k \in (0,1)$, за счет чего в случае дискретной СУМП может быть повышена точность регулирования при прочих равных условиях.

Основные результаты и выводы

В настоящем исследовании был рассмотрен комплекс мероприятий по интеграции постоянных магнитов в магнитную систему радиального АЭМП. В результате установлено, что в габаритах эксплуатируемого магнитного подвеса возможно размещение постоянных магнитов, необходимых для компенсации статической нагрузки АЭМП. Специфика независимых полюсов исходной конструкции предполагает замыкание потока между двумя полюсами одного электромагнита. Поэтому секторы ярма, расположенные между электромагнитами, не нагружены магнитным потоком, что дает возможность использовать это пространство для размещения ПМ.

С учетом специфики работы магнитного подшипника с использованием ПМ доказана возможность уменьшения тяговой силы управляемых полюсов до величины, определенной в (3), без потери рабочих свойств подвеса.

Тяговые характеристики АЭМП, определенные в результате численного моделирования, демонстрируют переход рабочей точки скважности управляющего сигнала в область $k = 0,5$ (при заданном законе управления). За счет этого может быть снижено энергопотребление радиального АЭМП. При этом все управляющие полюса находятся в близких электромагнитных и тепловых условиях, что положительно влияет на стабильность подвеса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Schweitzer G.* Magnetic bearings: theory, design, and application to rotating machinery. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. – 535 pp.
2. *Журавлев Ю.Н.* Активные магнитные подшипники: теория, расчет, применение. – СПб.: Политехника, 2003. – 206 с.
3. *Сарычев А.П.* Разработка электромагнитных подшипников для серии компрессоров газоперекачивающих агрегатов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М.: Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» им. А.Г. Иосифьяна, 2009. – Т. 110. – С. 3–10.
4. *Макриденко Л.А.* Состояние и перспективы развития электромагнитных подшипников в ФГУП «НПП ВНИИЭМ» // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М.: Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» им. А.Г. Иосифьяна, 2011. – С. 3–12.
5. *Макаричев Ю.А., Стариков А.В.* Теоретические основы расчета и проектирования радиальных электромагнитных подшипников. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 150 с.
6. *Макаричев Ю.А., Иванников Ю.Н.* Энергетические процессы активного электромагнитного подвеса // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2020. – № 3(60). – С. 112–119.
7. *Верещагин В.П., Рогоза А.В.* Сравнение различных типов электромагнитных подшипников // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М.: Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» им. А.Г. Иосифьяна, 2011. – Т. 122. – С. 11–16.
8. *Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф., Ларионов А.Н.* Электрические машины с постоянными магнитами. – М.–Л.: Энергия, 1964. – 480 с.

9. Zubkov Yu.V., Makarichev Yu.A., Ivannikov Yu.N. Comparison of surface-mounted permanent magnet and interior-mounted permanent magnet starters for gas turbine engines electrical start // International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, 2019. DOI: 10.1109/ICOECS46375.2019.8950010
10. Исмагилов Ф.Р. Электрические системы с высококоэрцитивными постоянными магнитами. – М.: Машиностроение, 2014. – 267 с.
11. Метлин В. Б. Магнитные и магнитогидродинамические опоры. – М.: Энергия, 1968. – 192 с.: ил.
12. Filatov A., Hawkins P., McMullen P. Homopolar Permanent-Magnet-Biased Actuators and Their Application in Rotational Active Magnetic Bearing Systems // Actuators 2016, 5, 26. DOI: 10.3390/act5040026.
13. Wajnert D., Tomczuk B. Analysis of spatial thermal field in a magnetic bearing // Open physics formerly Central European Journal of Physics. – 2017. DOI: <https://doi.org/10.1515/phys-2018-0010>.
14. Патент России № 2540215 С1. Гибридный магнитный подшипник с осевым управлением / А.А. Герасин, Г.А. Чуянов, Ф.Р. Исмагилов [и др.] // Оpubл. 10.02.2015. Бюл. № 4.
15. Верецагин В.П., Рогоза А.В., Савинова Т.Н. Методика проектирования электромагнитных подшипников // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М.: Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» им. А.Г. Иосифьяна, 2009. – Т. 113. – С. 3–12.
16. Макаричев Ю.А., Зубков Ю.В., Иванников Ю.Н. Анализ характеристик электромеханического стартера газотурбинной установки // Электротехника. – 2019. – № 7. – С. 24–32.
17. Кулон Ж.-Л., Сабоннадьер Ж.-К. Метод конечных элементов и САПР: Пер. с франц. – М.: Мир, 1989. – 12 л.: ил.

Статья поступила в редакцию 3 октября 2020 г.

HYBRID MAGNETIC BEARING

Yu.A. Makarichev, Yu.N. Ivannikov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. Increase of energy efficiency and decrease of weight-size parameters is an important problem for improvement of magnetic bearings. Using of permanent magnets on base of rare earth metals is promising direction for improvement of consumer properties of magnetic bearings. In a paper some questions of integrate of permanent magnets in a radial magnetic bearing for rotor weight offsetting was considered. Simple mathematical model that link carrying capacity with pole dimensions was consider. The dimensions poles of a hybrid magnetic bearing in identical external size was calculation by using proposed policy. Hereafter magnetic field was researched by means of numerical simulation for traditional and hybrid magnetic bearings and traction performance depending on control current was founded for various location of rotor. Analytical calculation and numerical simulation demonstrate that traction force creating by permanent magnets offset of rotor weight in full but traction force creating by electromagnets full provide operating traction force. Installations of permanent magnets render possible decrease of magneto motive force of control poles, size of a coil and finally, increase of energy efficiency of a magnetic

Yuri A. Makarichev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

Yuri N. Ivannikov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Yaroslav A. Ratzev, Graduate Student.

Yevgeny A. Polyansky, Postgraduate student.

bearing. Using of permanent magnets essentially action on traction performance of a magnetic bearing. Operating point was displaced in mean region of traction performance curve. In results all coil of electromagnets happened in equal terms on temperature. Considered properties of a hybrid magnetic bearing may have to influence on a dynamic performance of a control system positive.

Keywords: active magnetic bearing, magnetic bearing, energy efficiency, permanent magnet, traction performance, magnetic field.

REFERENCES

1. Schweitzer G. Magnetic bearings: theory, design, and application to rotating machinery. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. – 535 pp.
2. Zhuravlev Yu.N. Active Magnetic Bearing: theory, calculation, application. SPb.: Politekhnika, 2003. – 206 s. (In Russian)
3. Sarychev A.P. Developing of Magnetic Bearing for Series of Gas-Compressor Unit // Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIEM. M.: Joint Company ‘Research and Production Corporation ‘Space Monitoring Systems, Information & Control and Electromechanical Complexes’ named after A. G. Iosifian’, t. 110, 2009. – S. 3–10. (In Russian)
4. Makridenko L.A. Current state and development trends of electromagnetic bearing from FGUP “NPP VNIEM”. Joint Company ‘Research and Production Corporation ‘Space Monitoring Systems, Information & Control and Electromechanical Complexes’ named after A. G. Iosifian’, 2011. – P. 3–12. (In Russian)
5. Makarichev Yu.A., Starikov A.V. Theoretical science of calculation and development of radial electromagnetic bearing. Moscow: Energoatomizdat, 2009. – 150 p. (In Russian)
6. Makarichev Yu.A., Ivannikov Yu.N. Energy processes in an active magnetic bearing. Electric power. Transmission and distribution. 2020. № 3(60). P. 112–119.
7. Vereshchagin V.P., Rogoza A.V. Comparison of different designs of magnetic bearing. Joint Company ‘Research and Production Corporation ‘Space Monitoring Systems, Information & Control and Electromechanical Complexes’ named after A. G. Iosifian’, p. 122, 2011. – P. 11–16 (In Russian)
8. Balagurov V.A., Galteev F.F., Larionov A.N. Electric machines with permanent magnets. M.–L.: Energiya, 1964. – 480 p. (In Russian)
9. Zubkov Yu.V., Makarichev Yu.A., Ivannikov Yu.N. Comparison of surface-mounted permanent magnet and interior-mounted permanent magnet starters for gas turbine engines electrical start // International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, 2019. DOI: 10.1109/ICOECS46375.2019.8950010
10. Ismagilov F.R. Electric system with high-coercitivity permanent magnets. M.: Mashinostroenie, 2014. – 267 p. (In Russian)
11. Metlin V.B. Magnetic and magnetohydrodynamics bearings. M.: Energiya, 1968. – 192 p. (In Russian)
12. Filatov A., Hawkins P., McMullen P. Homopolar Permanent-Magnet-Biased Actuators and Their Application in Rotational Active Magnetic Bearing Systems // Actuators 2016, 5, 26 DOI:10.3390/act5040026
13. Wajnert D., Tomczuk B. Analysis of spatial thermal field in a magnetic bearing // Open physics formerly Central European Journal of Physics. – 2017. DOI: <https://doi.org/10.1515/phys-2018-0010>
14. Russian patent № 2540215 S1. Hybrid magnetic bearing with axial control / A.A. Gerasin, G.A. Chuyanov, F.R. Ismagilov [al et.] // Opubl. 10.02.2015. Byul. № 4. (In Russian)
15. Vereshchagin V.P., Rogoza A.V., Savinova T.N. Design technique of magnetic bearing Joint Company ‘Research and Production Corporation ‘Space Monitoring Systems, Information & Control and Electromechanical Complexes’ named after A. G. Iosifian’, p. 113, 2009. – p. 3–12. (In Russian)
16. Makarichev Yu.A., Zubkov Yu.V., Ivannikov Yu.N. Characteristic analysis of electromechanic starter motor of gas-turbine unit. Elektrotehnika, 2019, № 7. – P. 24–32. (In Russian)
17. Coulomb J.L., Sabonnadiere J.C. finite-element method and CAD system. – M.: Mir, 1989. – 12 q.

УДК 621.3.078

НАБЛЮДАТЕЛЬ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ***А.В. Стариков¹, Е.В. Стрижакова¹, О.С. Беляева¹,
Аббас А. Карим Альтахер²***¹ Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244² Ульяновский государственный технический университет
Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32

Аннотация. *Статья посвящена математическим основам создания бездатчиковых систем стабилизации скорости асинхронных двигателей со скалярным управлением. Существует большое количество применений электроприводов переменного тока, где требуется именно скалярное управление, а применение датчиков скорости невозможно по техническим или экономическим причинам. Большинство же современных наблюдателей скорости асинхронного двигателя предназначены для электроприводов с векторным управлением и базируются на решении дифференциальных уравнений с применением фильтров Калмана или адаптивной модели асинхронного двигателя. В статье рассматривается новый подход к созданию наблюдателя скорости, основанный на решении алгебраического уравнения механической характеристики асинхронного двигателя. Проанализировано изменение скорости ротора двигателя под действием момента нагрузки и вариации напряжения статора. Введен в рассмотрение коэффициент, связывающий скорость асинхронного двигателя с напряжением. Показано, что его величина зависит от начальных условий и момента нагрузки. Учтена нелинейная связь момента, развиваемого двигателем, с током статора. В результате найдена аналитическая зависимость, связывающая скорость асинхронного двигателя с действующими значениями напряжения и тока статора и частотой этих величин. Проведена оценка адекватности полученной формулы для расчета скорости асинхронного двигателя в системе скалярного частотного управления. Приведены результаты натурных экспериментов, которые показывают, что максимальная погрешность вычисления скорости по найденной аналитической зависимости не превышает 4,3 %. Сделан вывод о целесообразности применения полученной формулы в наблюдателе скорости асинхронного двигателя электропривода со скалярным управлением.*

Ключевые слова: *электропривод переменного тока, наблюдатель скорости, асинхронный двигатель, скалярное частотное управление.*

Создание электроприводов с асинхронными исполнительными двигателями, обладающих большим диапазоном регулирования, требует применения датчиков скорости. Однако существуют области применения, в которых установка датчи-

Стариков Александр Владимирович (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Электропривод и промышленная автоматика».

Стрижакова Елена Владимировна, доцент кафедры «Теоретическая и общая электротехника»).

Беляева Ольга Сергеевна, аспирант.

Альтахер Аббас А. Карим, аспирант.

ков скорости нецелесообразна по экономическим соображениям или вообще невозможна по конструктивным особенностям объекта автоматизации. Примером последнего являются погружные асинхронные двигатели в приводах центробежных насосов, применяемых для механизированной добычи нефти. В связи с этим актуальной задачей является косвенное измерение скорости асинхронного двигателя с помощью так называемых наблюдателей, которые фактически являются цифровыми вычислительными устройствами или алгоритмами.

Существует большое количество работ, посвященных проблеме создания наблюдателей скорости асинхронных двигателей [1–4]. Большинство из них базируется на векторном представлении таких величин, как напряжение, ток и потокосцепление и предназначено для создания бездатчиковых систем векторного управления асинхронными двигателями. Однако существует множество приложений, например при механизированной добыче нефти, транспортировке грузов ленточными конвейерами, охлаждении газа на компрессорных станциях, когда требуется скалярное управление и в то же время необходима информация о скорости вращения асинхронного двигателя. Действительно, при механизированной добыче нефти погружными центробежными насосами принципиально принимается линейный или квадратичный закон изменения напряжения в функции частоты, что прописано в нормативных документах и подразумевает скалярное управление асинхронным двигателем. С другой стороны, информация о скорости вращения ротора погружного двигателя позволяет выбрать оптимальное значение напряжения питания, получаемое от промышленной подстанции. В многодвигательных электроприводах ленточных конвейеров также имеется необходимость косвенного измерения скорости вращения, поскольку в этом случае можно избежать упругих колебаний ленты транспортера. Причем приводы конвейеров, как правило, не требуют большого диапазона регулирования скорости, поэтому применение векторного управления нецелесообразно.

В связи с этим целью проводимого исследования является получение аналитических зависимостей, позволяющих с определенной степенью точности рассчитать скорость вращения асинхронного двигателя при скалярном частотном управлении.

Обычно для создания бездатчиковых электроприводов используют наблюдатели состояния на основе фильтра Калмана или адаптивной модели асинхронного двигателя [1, 5–8]. В основу этих наблюдателей положены принципы решения дифференциальных уравнений, описывающих движение электрической машины переменного тока. При этом появляется необходимость многократного цифрового дифференцирования сигналов датчиков напряжений и токов, что значительно усложняет вычислительные процедуры и приводит к появлению ошибок расчета скорости, связанных с погрешностью первичных измерителей и квантованием сигналов по времени и уровню.

Поэтому для решения поставленной задачи предлагается использовать следующее упрощенное представление об изменении скорости асинхронного двигателя на основе его механических характеристик (рис. 1). Будем считать, что при вариации напряжения U_1 на статорной обмотке двигателя (без изменения частоты) критическая скорость ω_k , соответствующая критическому скольжению, остается неизменной, а критический момент изменяется пропорционально квадрату напряжения [9–3]. Известно, что скорость идеального холостого хода ω_0 асинхронного двигателя при изменении напряжения остается неизменной [9–14].

Падение скорости вращения ротора относительно ω_0 разделим на две составляющие: $\Delta\omega_1$ – падение скорости под действием момента нагрузки; $\Delta\omega_2$ – изменение скорости вследствие уменьшения (или увеличения) напряжения статора на величину ΔU_1 .

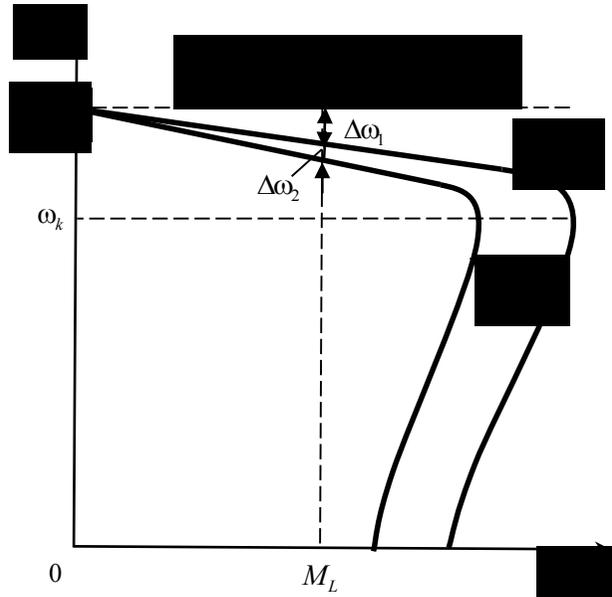


Рис. 1. Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении напряжения

Предположим, что участок механической характеристики асинхронного двигателя при изменении момента от 0 до номинального значения M_{nom} можно аппроксимировать линейной зависимостью. Тогда падение скорости под действием нагрузки будет подчиняться выражению

$$\Delta\omega_1 = \frac{(\omega_0 - \omega_{nom})M_L}{M_{nom}}, \quad (1)$$

где M_L – момент нагрузки;

ω_{nom} – номинальная скорость двигателя.

Статическое изменение скорости $\Delta\omega_2$ под действием вариации напряжения статора предлагается вычислять с помощью линеаризованной математической модели асинхронного двигателя [15]. Применение метода аналогии позволяет получить передаточную функцию двигателя по отношению к изменению фазного напряжения статора. При этом вводится в рассмотрение коэффициент передачи асинхронного двигателя по отношению к ΔU_1 :

$$k_{du}^{U_1} = \frac{\Delta\omega_2}{\Delta U_1} = \frac{A_{71}A_{65} + A_{62}A_{76}}{A_{71}A_{84} + A_{63}A_{76}}, \quad (2)$$

где $A_{62} = (1 + B^2 - DF)(AB - C)D + A_{20}A_{30}$;

$$\begin{aligned}
A_{63} &= [\Psi_{2y0}A_{20} + \Psi_{2x0}(1+B^2-DF)](1+B^2)T_2; \\
A_{65} &= A_{30}[(1+B^2)\Psi_{1y0} - BF\Psi_{2x0} - F\Psi_{2y0}] + \\
&+ (1+B^2-DF)[(C-AB)\Psi_{2x0} - (A+BC)\Psi_{2y0}]; \\
A_{71} &= (1+B^2-DF)^2 + A_{20}^2; \\
A_{76} &= (1+B^2-DF)[(1+B^2)\Psi_{1x0} - F\Psi_{2x0} + BF\Psi_{2y0}] - \\
&- A_{20}[(1+B^2)\Psi_{1y0} - BF\Psi_{2x0} - F\Psi_{2y0}]; \\
A_{76} &= (1+B^2-DF)[(1+B^2)\Psi_{1x0} - F\Psi_{2x0} + BF\Psi_{2y0}] - \\
&- A_{20}[(1+B^2)\Psi_{1y0} - BF\Psi_{2x0} - F\Psi_{2y0}]; \\
A_{84} &= (1+B^2)\Psi_{2y0}[(1+B^2)\Psi_{1y0} - F\Psi_{2y0} - BF\Psi_{2x0}]T_2; \\
A &= C = T_1; \\
B &= \frac{2\pi T_1 f_{10}}{Z_p}; \\
D &= \frac{L_0}{L_1}; \\
F &= \frac{L_0}{L_2}; \\
A_{20} &= (H - T_2 \omega_{00})(1+B^2) + BDF; \\
A_{30} &= D(A+BC);
\end{aligned}$$

$$T_1 = \frac{\Delta}{R_1 L_2'}; \quad T_2 = \frac{\Delta}{R_2' L_1} \quad - \text{ электромагнитные постоянные времени цепей статора}$$

и ротора;

$\Delta = L_1 L_2' - L_0^2$; L_1 и R_1 – индуктивность и активное сопротивление цепи статора;

L_2' и R_2' – приведенные индуктивность и активное сопротивление цепи ротора;

L_0 – взаимная индуктивность;

ω_{00} и f_{10} , – начальные значения угловой скорости вращения магнитного поля и частоты питающего напряжения;

Ψ_{1x0} , Ψ_{1y0} , Ψ_{2x0} и Ψ_{2y0} – начальные условия проекций потокоцеплений статора и ротора на вращающуюся вместе с магнитным полем систему координат Oxy .

Формула (2) позволяет рассчитать коэффициент $k_{du}^{U_1}$ по известным параметрам Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя и начальным условиям ω_{00} , f_{10} , Ψ_{1x0} , Ψ_{1y0} , Ψ_{2x0} и Ψ_{2y0} , которые могут быть получены методом математического моделирования конкретного типа двигателя, например при номинальных значениях частоты, напряжения и момента нагрузки.

Отличительной особенностью асинхронного двигателя является то, что он

представляет собой нелинейный объект управления. Поэтому коэффициент $k_{du}^{U_1}$ будет изменять свое значение в зависимости от начальных условий, причем следует отметить, что он существенно зависит от момента нагрузки. Проведенные исследования показали, что при $M_L = 0$ этот коэффициент также будет равен нулю. Предполагая линейную зависимость $k_{du}^{U_1}$ от момента нагрузки M_L , можно рассчитать изменение скорости вращения ротора двигателя при вариации напряжения статора по формуле

$$\Delta\omega_2 = \frac{k_{du}^{U_1} \Delta U_1 M_L}{M_{nom}}, \quad (3)$$

где используется значение $k_{du}^{U_1}$, определенное при номинальном моменте нагрузки M_{nom} .

В то же время величина $k_{du}^{U_1}$ зависит от частоты и действующего значения питающего напряжения U_1 , причем, как показывают исследования, эта зависимость нелинейна. Если в частотном преобразователе используется линейный закон регулирования напряжения в функции частоты

$$U_1 = k_{U1} f_1,$$

где k_{U1} – коэффициент пропорциональности, то приближенно зависимость коэффициента $k_{du}^{U_1}$ от f_1 можно аппроксимировать формулой

$$k_{du}^{U_1} = k_{du, nom}^{U_1} \left(\frac{f_{1nom}}{f_1} \right)^{\left(a + \frac{b}{f_1} \right)}, \quad (4)$$

где f_{1nom} – номинальная частота;

$k_{du, nom}^{U_1}$ – значение коэффициента $k_{du}^{U_1}$, рассчитанное при номинальной частоте питающего напряжения;

a и b – коэффициенты, определяемые в процессе идентификации зависимости.

Следует отметить, что величина $\Delta\omega_1$ всегда отрицательна, а знак $\Delta\omega_2$ зависит от знака приращения напряжения ΔU_1 относительно номинального значения.

Таким образом, с учетом (1), (3) и (4) скорость вращения ротора асинхронного двигателя будет определяться уравнением

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega_1 + \Delta\omega_2 = \omega_0 - \frac{\left[\omega_0^{50} - \omega_{nom} - k_{du, nom}^{U_1} \left(\frac{f_{1nom}}{f_1} \right)^{\left(a + \frac{b}{f_1} \right)} \Delta U_1 \right] M_L}{M_{nom}}, \quad (5)$$

где ω_0^{50} – скорость идеального холостого хода при номинальной частоте питающего напряжения.

Ток статора асинхронного двигателя связан с моментом на валу известной зависимостью [13]

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + \frac{(I_{1nom}^2 - I_0^2)M_L^2}{M_{nom}^2}}, \quad (6)$$

где I_{1nom} – номинальный ток статора; I_0 – ток холостого хода.

Из (6) можно найти связь между моментом нагрузки, током статора и номинальными характеристиками двигателя

$$M_L = M_{nom} \sqrt{\frac{I_1^2 - I_0^2}{I_{1nom}^2 - I_0^2}}. \quad (7)$$

Подставив (7) в (5), получим выражения для расчета скорости

$$\omega = \omega_0 - \frac{\left[\omega_0^{50} - \omega_{nom} - k_{du, nom}^{U_1} \left(\frac{f_{1nom}}{f_1} \right)^{\left(a + \frac{b}{f_1} \right)} \Delta U_1 \right] \sqrt{I_1^2 - I_0^2}}{\sqrt{I_{1nom}^2 - I_0^2}}.$$

С учетом того, что скорость идеального холостого хода связана с частотой питающего напряжения f_1 и числом пар полюсов Z_p формулой

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{Z_p},$$

а ток холостого хода также зависит от частоты

$$I_0 = \frac{k_{U1} f_1}{\sqrt{(R_1 + R_0)^2 + (2\pi f_1 L_1)^2}},$$

получим аналитическое выражение для расчета скорости асинхронного двигателя при скалярном частотном управлении

$$\omega = \frac{2\pi f_1}{Z_p} - \left[\omega_0^{50} - \omega_{nom} - k_{du, nom}^{U_1} \left(\frac{f_{1nom}}{f_1} \right)^{\left(a + \frac{b}{f_1} \right)} (U_1 - k_{U1} f_1) \right] \times \sqrt{\frac{\left(I_1^2 - \left[\frac{k_{U1} f_1}{\sqrt{(R_1 + R_0)^2 + (2\pi f_1 L_1)^2}} \right]^2 \right)}{\left(I_{1nom}^2 - \left[\frac{k_{U1} f_1}{\sqrt{(R_1 + R_0)^2 + (2\pi f_1 L_1)^2}} \right]^2 \right)}}, \quad (8)$$

где R_0 – активное сопротивление цепи намагничивания.

Формулу (8) можно использовать при создании наблюдателя скорости асинхронного двигателя при скалярном частотном управлении, который по измерен-

ным (заданным) значениям частоты f_1 и действующим значениям фазного напряжения U_1 и тока I_1 статора вычисляет ω (рис. 2). Величины Z_p , ω_0^{50} , ω_{nom} , I_{1nom} , f_{1nom} , k_{U1} определяются из технических характеристик исполнительного электродвигателя, коэффициенты $k_{du, nom}^U$ a и b рассчитываются на основании результатов математического моделирования.

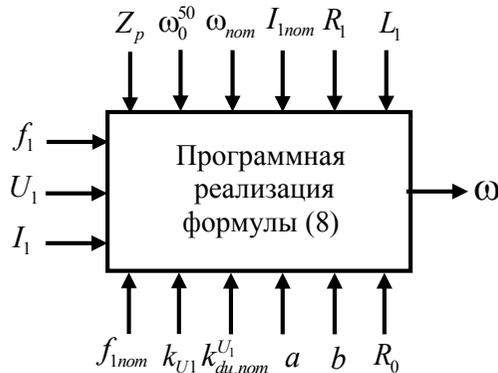


Рис. 2. Упрощенная функциональная схема наблюдателя (вычислителя) скорости вращения асинхронного двигателя при скалярном частотном управлении

Параметры схемы замещения асинхронного двигателя R_1 , L_1 и R_0 могут быть найдены в справочниках по электрическим машинам.

Для оценки адекватности формулы (8) проведем сравнение результатов вычисления скорости ω_{cal} с данными, полученными на экспериментальной установке, оснащенной асинхронным двигателем А-51-4 и нагрузочной машиной постоянного тока. Скорость двигателя при проведении эксперимента регулировалась с помощью частотного преобразователя «Омега», а измерение скорости осуществлялось с помощью тахогенератора ТМГ 30.

Двигатель А-51-4 имеет следующие технические характеристики: номинальное фазное напряжение $U_{1nom} = 220$ В; мощность $P_{1nom} = 4500$ Вт; $f_{1nom} = 50$ Гц; $Z_p = 2$; $\omega_0^{50} = 157,08$ рад/с; $\omega_{nom} = 130,9$ рад/с; $I_{1nom} = 9,4$ А. Параметры Т-образной схемы замещения этого двигателя, полученные из данных каталога, имеют следующие значения: $L_1 = 0,1839$ Гн; $R_1 = 1,513$ Ом; $L_2' = 0,188$ Гн; $R_2' = 1,158$ Ом; $L_0 = 0,1782$ Гн, а постоянные времени цепей статора и ротора равны $T_1 = 0,0099$ с, $T_2 = 0,0132$ с. Следует отметить, что величина $\omega_{nom} = 146,6$ рад/с взята не из паспортных данных двигателя, а из результатов натурных экспериментов.

Тахогенератор ТМГ 30 имеет выходное напряжение 280 В при скорости вращения 4000 об/мин, то есть имеет коэффициент передачи $k_{ss} = 1,496$ рад/Вс, что позволяет определить угловую скорость ω_{exp} в ходе эксперимента.

Моделирование уравнений движения асинхронного двигателя А-51-4 в программной среде Matlab Simulink при номинальных значениях напряжения, частоты и момента нагрузки показало, что установившиеся значения (начальные усло-

вия) потокосцеплений равны $\psi_{1x0} = 1,431$ Вс, $\psi_{1y0} = -1,289$ Вс, $\psi_{2x0} = 1,328$ Вс, $\psi_{2y0} = -1,309$ Вс, при этом $\omega_{00} = 153,631$ рад/с. Расчет по формуле (2) с этими начальными условиями дает нам величину $k_{du}^{U_1} = 0,033$ рад/Вс. Компьютерное моделирование при разных частотах и действующих значениях напряжения (табл. 1) позволило идентифицировать график зависимости $k_{du}^{U_1}$ от частоты f_1 и определить величины необходимых для применения формулы (8) коэффициентов, которые оказались равными $a = 1,2$ и $b = 1$ Гц.

Таблица 1

Результаты компьютерного моделирования асинхронного двигателя А-51-4 при разных частотах и действующих значениях напряжения статора

f_1 , Гц	50	25	10	5	2,5
U_1 , В	220	110	44	22	11
$k_{du}^{U_1}$, рад/Вс	0,033	0,075	0,321	0,78	2,821

В частотном преобразователе «Омега» используется линейный закон регулирования напряжения в функции частоты, поэтому для рассматриваемого двигателя $k_{U1} = 4,388$ В/Гц.

В ходе экспериментов проводилась вариация заданной частоты питающего напряжения от 2,5 до 50 Гц, при этом величина фазного напряжения U_1 и тока I_1 статора асинхронного двигателя фиксировалась с дисплея частотного преобразователя (рис. 3).



Рис. 3. Дисплей частотного преобразователя «Омега» с информацией о токе статора

С помощью нагрузочной машины постоянного тока регулировался момент на валу асинхронного двигателя в пределах от 0 до 5,6 Нм.

Результаты экспериментов и вычислений скорости по формуле (8) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты экспериментов и вычислений

f_1 , Гц	U_1 , В	I_1 , А	ω_{cal} , рад/с	ω_{exp} , рад/с	Δ_{cal} , %
50	220	4,4	154,37	153,19	0,8
25	109,9	4	76,96	76,6	0,5
10	43,8	4	29,57	29,62	-0,2
5	22	3,7	14,1	13,76	2,45
2,5	11	3	6,55	6,28	4,3

За истинное значение скорости принималась величина ω_{exp} , получаемая с помощью тахогенератора, и относительная ошибка вычисления скорости Δ_{cal} по формуле (8) определялась как

$$\Delta_{cal} = \frac{\omega_{cal} - \omega_{exp}}{\omega_{exp}} \times 100, \%$$

Данные табл. 2 позволяют построить график зависимости модуля относительной погрешности вычисления скорости $|\Delta_{cal}|$ асинхронного двигателя, например в функции частоты питающего напряжения (рис. 4).

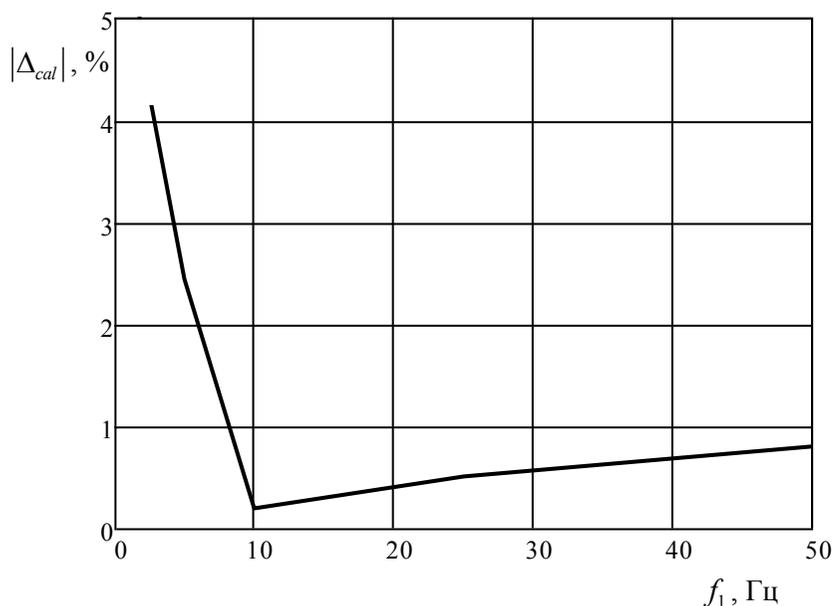


Рис. 4. Зависимость относительной погрешности вычисления скорости асинхронного двигателя при скалярном управлении

Результаты, приведенные в табл. 2, и график (см. рис. 4) показывают, что максимальная относительная ошибка вычисления скорости вращения асинхронного двигателя при скалярном управлении в рассматриваемом частотном диапазоне не превышает 4,3 %. Причем очевидно, что увеличение относительной погрешности вычисления на малых частотах связано с уменьшением абсолютного значения скорости двигателя.

Следовательно, полученную формулу можно использовать в наблюдателях скорости электропривода переменного тока со скалярным управлением. Предложенный подход к вычислению скорости после соответствующей корректировки можно распространить и на системы с векторным управлением без датчика скорости. Однако при этом необходимо учитывать инерционность первичных измерителей действующих значений напряжений и токов. Кроме того, на точность работы наблюдателя скорости вращения асинхронного двигателя будет оказывать существенное влияние погрешность этих измерителей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Анучин А.С.* Системы управления электроприводов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2015. – 373 с.
2. *Калачев Ю.Н.* Наблюдатели состояния в векторном электроприводе. – М., 2015. – 80 с.
3. *Панкратов В.В., Котин Д.А.* Синтез адаптивных алгоритмов вычисления скорости асинхронного электропривода на основе второго метода Ляпунова // *Электричество*. – 2007. – № 8. – С. 48–53.
4. *Вдовин В.В.* Адаптивные алгоритмы оценщика координат бездатчиковых электроприводов переменного тока с расширенным диапазоном регулирования: дис... канд. техн. наук. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2014. – 244 с.
5. *Виноградов А.Б., Колодин И.Ю.* Бездатчиковый асинхронный электропривод с адаптивно-векторной системой управления // *Электричество*. – 2007. – № 2. – С. 44–50.
6. *Ланграф С.В., Глазырин А.С.* Применение фильтра Калмана в моментном асинхронном электроприводе с векторным бездатчиковым управлением // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2009. – № 6. – С. 61–64.
7. *Ланграф С.В., Глазырин А.С., Афанасьев К.С.* Применение наблюдателя Люенбергера для синтеза векторных бездатчиковых асинхронных электроприводов // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. – 2011. – № 6. – С. 57–62.
8. *Афанасьев К.С., Глазырин А.С.* Идентификация скорости асинхронного электродвигателя лабораторного стенда с помощью фильтра Калмана и наблюдателя Люенбергера // *Электротехнические комплексы и системы управления*. – 2012. – № 4 (28). – С. 66–69.
9. *Ковчин С.А., Сабини Ю.А.* Теория электропривода. – СПб.: Энергоатомиздат, 1994. – 496 с.
10. *Ключев В.И.* Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
11. *Онищенко Г.Б.* Электрический привод. – М.: РАСХН, 2003. – 320 с.
12. *Терехов В.М., Осипов О.И.* Системы управления электроприводов. – М.: Академия, 2005. – 300 с.
13. *Михайлов О.П.* Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов. – М.: Машиностроение, 1990. – 304 с.
14. *Соколовский Г.Г.* Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. – М.: Академия, 2006. – 265 с.
15. *Стариков А.В., Лисин С.Л., Табачникова Т.В., Косорлуков И.А., Беляева О.С.* Линеаризованная математическая модель погружного асинхронного двигателя // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки*. – 2019. – № 4 (64). – С. 155–167.

Статья поступила в редакцию 20 сентября 2020 г.

ASYNCHRONOUS MOTOR ROTATION SPEED OBSERVER

A.V. Starikov¹, E.V. Strizhakova¹, O.S. Belyaeva¹, Abbas A. Kareem Altaher²

¹ Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

² Ulyanovsk State Technical University
32, st. Northern Crown, Ulyanovsk, 432027, Russian Federation

Abstract. *The paper is devoted to the mathematical foundations of creating sensorless speed stabilization systems for induction motors with scalar control. There are many applications of AC electric drives where scalar control is required, and the use of speed sensors is impossible for technical or economic reasons. Most modern observers of the asynchronous motor speed are intended for electric drives with vector control and are based on solving differential equations using Kalman filters or an adaptive model of an asynchronous motor. The paper discusses a new approach to creating a speed observer, based on solving the algebraic equation of the induction motor mechanical characteristics. The change in the rotor speed of the motor under the influence of the load torque and the variation of the stator voltage is analyzed. A coefficient connecting the speed of an induction motor with voltage is introduced. It is shown that its value depends on the initial conditions and the moment of loading. The nonlinear relationship between the torque developed by the motor and the stator current is taken into account. As a result, the analytical relationship is found that connects the speed of an induction motor with the effective values of the stator voltage and current and the frequency of these values. An assessment of the adequacy of the obtained formula for calculating the induction motor speed in a scalar frequency control system is carried out. The results of field experiments are presented, which show that the maximum error in calculating the speed from the found analytical dependence does not exceed 4.3%. It is concluded that the use of the formula obtained is essential in the asynchronous motor speed observer of the electric drive with scalar control.*

Keywords: *AC electric drive, speed observer, induction motor, scalar frequency control.*

REFERENCES

1. *Anuchin A.S.* Control systems for electric drives. Moscow: Publishing house MEI, 2015. 373 p.
2. *Kalachev Yu.N.* State observers in a vector drive. Moscow, 2015. 80 p.
3. *Pankratov V.V., Kotin D.A.* Synthesis of adaptive algorithms for calculating the speed of an asynchronous electric drive based on the second Lyapunov method. *Electricity*. No. 8. 2007. Pp. 48–53.
4. *Vdovin V.V.* Adaptive Coordinate Estimator Algorithms sensorless AC drives with an extended control range: Dis.... Cand. tech. Sciences. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2014. 244 p.
5. *Vinogradov A.B., Kolodin I.Yu.* Sensorless asynchronous electric drive with an adaptive vector control system. *Electricity*. No. 2. 2007. Pp. 44–50.
6. *Langraf S.V., Glazyrin A.S.* Application of the Kalman filter in a torque asynchronous electric drive with vector sensorless control. *News of higher educational institutions. Electromechanics*. No. 6. 2009. Pp. 61–64.

Alexander V. Starikov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor, Head of the Department «Electric Drive and Industrial Automation».

Elena V. Strizhakova (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Olga S. Belyaeva, Postgraduate Student.

Abbas A. Kareem Altahe, Postgraduate Student.

7. *Langraf S.V., Glazyrin A.S., Afanasyev K.S.* The use of the Luenberger observer for the synthesis of vector sensorless asynchronous electric drives. News of higher educational institutions. Electromechanics. No. 6. 2011. Pp. 57–62.
8. *Afanasyev K.S., Glazyrin A.S.* Identification of the speed of the asynchronous electric motor of the laboratory stand using the Kalman filter and the Luenberger observer. Electrotechnical complexes and control systems. No. 4 (28). 2012. Pp. 66–69.
9. *Kovchin S.A., Sabini Yu.A.* Electric drive theory. St. Petersburg: Energoatomizdat, 1994. 496 p.
10. *Klyuchev V.I.* Theory of electric drive. Moscow: Energoatomizdat, 2001. 704 p.
11. *Onishchenko G.B.* Electric drive. Moscow: RAAS, 2003. – 320 p.
12. *Terekhov V.M., Osipov O.I.* Control systems for electric drives. Moscow: Academy, 2005. 300 p.
13. *Mikhailov O.P.* Automated electric drive of machine tools and industrial robots. Moscow: Mechanical engineering, 1990. 304 p.
14. *Sokolovsky G.G.* AC electric drives with frequency regulation. Moscow: Academy, 2006. 265 p.
15. *Starikov A.V., Lisin S.L., Tabachnikova T.V., Kosorlukov I.A., Belyaeva O.S.* Linearized mathematical model of a submersible induction motor. Bulletin of the Samara State Technical University. Series. “Engineering sciences”, 4(64). 2019. Samara: SSTU. Pp. 155–167.